



M 2015

DURABILIDADE DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO À BASE DE CAL HIDRÁULICA NATURAL

VERA ALEXANDRA GOMES FRANCISCO
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA
À FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO EM
ENGENHARIA CIVIL

DURABILIDADE DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO À BASE DE CAL HIDRÁULICA NATURAL

VERA ALEXANDRA GOMES FRANCISCO

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM MATERIAIS E PROCESSOS DE
CONSTRUÇÃO**

Orientador: Professora Doutora Maria Joana Álvares Ribeiro de
Sousa Coutinho

Coorientador: Engenheira Dina Filipe Frade

JUNHO DE 2015

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2014/2015

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2014/2015 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2015*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

A meus PAIS e IRMÃO,
Fátima, Fernando e Ricardo.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho nunca seria possível de realizar sem a ajuda das inúmeras pessoas que direta ou indiretamente intervieram nele. Assim, pretendo neste texto expressar o meu agradecimento a todos aqueles que tornaram este trabalho possível.

À Professora Joana Sousa Coutinho, a minha orientadora da FEUP, pelo empenho, pela dedicação, pela motivação, pela paciência e essencialmente pela confiança demonstrados ao longo deste percurso.

Ao Engenheiro Luís Alberto Jorge Goucha Santos pela grande oportunidade de desenvolver o presente trabalho na empresa Secil Argamassas.

À Engenheira Dina Filipe Frade, a minha orientadora da empresa Secil Argamassas, pelas sugestões, apoio, motivação e disponibilidade prestada ao longo de todo este percurso.

À equipa do LEMC, nomeadamente à Cecília, à Dora, ao Gil, à Irene, à Lurdes, ao Manuel, ao Paulo e à Eng^a. Patrícia por todo o apoio prestado.

À Paula do LABEST por todo o apoio, paciência, persistência e tempo dispensado.

À equipa da Secil Argamassas por me acompanhar em grande parte deste percurso, e com especial carinho à Miquelina, à Raquel, à Eng^a. Sofia e ao Filipe pela atenção prestada e esclarecimento de dúvidas que surgiram ao longo do trabalho.

Este trabalho não seria possível também sem a ajuda indireta da família e amigos.

O meu maior obrigado é para os meus Pais, Fátima e Fernando, por todo o apoio ao longo dos anos e pelas oportunidades que me proporcionaram, devo-vos tudo o que sou hoje. Obrigado também pela paciência e motivação nos momentos mais difíceis e por todos os ensinamentos transmitidos.

Um grande obrigado ao meu Irmão, Ricardo, pois sem ele tudo isto não seria possível.

Aos meus Amigos, não apenas ao longo deste trabalho mas desde que eles estão presentes na minha vida, em especial ao Daniel, por todo o apoio, paciência, conselhos e carinho nos momentos bons e nos menos bons e à Carla por todo o apoio e amizade ao longo destes 5 anos.

RESUMO

Um processo de reabilitação urbana vai muito além da realização de trabalhos de conservação em edifícios, integrando estratégias de revitalização e modernização das áreas urbanas, históricas ou não.

Na reabilitação do revestimento de um edifício antigo, o novo revestimento deve cumprir requisitos para garantir a sua durabilidade uma vez que a degradação deste leva à deterioração rápida da alvenaria. Contudo importa referir que o revestimento serve como camada de sacrifício para proteger as alvenarias antigas. A durabilidade implica boa resistência mecânica, boa aderência ao suporte e entre camadas, boa resistência aos sais existentes nas paredes antigas e um bom comportamento relativamente à ação da água cuja absorção deverá ser relativamente lenta mas poder secar facilmente.

Na reabilitação de revestimentos em edifícios antigos a cal hidráulica natural tem um importante destaque face à cal aérea e ao cimento portland. Em comparação com a cal aérea, a cal hidráulica natural tem as vantagens de ganhar presa aérea e hidráulica permitindo uma cura mais consistente numa idade mais jovem, contribuindo para o desenvolvimento de resistências mecânicas superiores. Comparativamente com o cimento, a cal hidráulica natural tem um comportamento mais dúctil acompanhando mais facilmente os movimentos das estruturas.

Este trabalho teve como objetivo estudar possíveis ensaios para avaliar a durabilidade de argamassas à base de cal hidráulica natural e comparar as características de uma argamassa tradicional com uma argamassa industrial à base de cal hidráulica natural. Na realidade a avaliação da durabilidade de argamassas à base de cal ainda não está estabelecida.

Os ensaios foram realizados em provetes dos dois tipos de argamassa para determinar as resistências mecânicas em diferentes idades, massa volúmica do produto endurecido, módulo de elasticidade, aderência a diferentes suportes, retração, comportamento face à ação da água e resistência a ciclos de gelo/degelo. Além destes ensaios, para avaliar a durabilidade das argamassas, foram adaptados alguns ensaios utilizados na avaliação da durabilidade do betão para verificar a sua aplicabilidade em argamassas à base de cal hidráulica natural nomeadamente a penetração de iões cloreto, a resistividade e a expansão devido à reação álcali-silica (ASR). Foi possível nestes ensaios adaptados estabelecer procedimentos bem definidos.

A argamassa industrial apresentou melhor desempenho do que a argamassa tradicional em relação à resistência à compressão nas diferentes idades, à massa volúmica do produto endurecido, tendo valores dentro dos limites normalizados para argamassas de renovação e possuindo melhor comportamento face à água. Além disto, esta argamassa é mais resistente a ciclos de gelo/degelo. No que diz respeito à resistência à flexão a argamassa industrial excede os limites recomendados. Ambas as argamassas possuem tensões de aderência superiores aos limites estabelecidos para os diferentes suportes. Os ensaios de durabilidade revelaram-se aplicáveis a ambas as argamassas.

PALAVRAS-CHAVE: reabilitação, argamassa industrial, argamassa tradicional, cal hidráulica natural, durabilidade.

ABSTRACT

Urban rehabilitation goes far beyond conservation work integrating regeneration strategies of historical or non-historical urban areas.

Renovation renders for rehabilitation must comply with durability requirements as deterioration of the protective layer will lead to quick masonry degradation.

However a render acts as sacrificial layer when protecting old masonry. Durability implies good mechanical strength, adequate adhesion to the supporting material and in between layers, appropriate resistance to salts from the masonry and good behaviour in terms of water movement where absorption must be slow but evaporation must be easy.

In rendering renovation of old buildings hydraulic lime is more important than aerial lime and cement. Natural hydraulic lime cures both in the air and in water leading to a more consistent material at earlier ages and thus contributing to improved mechanical strength compared to aerial lime. Natural hydraulic lime presents a more ductile behaviour compared to cement, consequently better adapting to structural movement.

The aim of this work was to compare mortar containing natural hydraulic lime produced traditionally with industrial renovation mortar, also considering durability. Durability assessment of lime based materials is not established yet. Therefore procedures from durability testing on other materials were adapted for the mortar types studied.

The tests were performed on of two types of mortar specimens to determine mechanical strength at different ages, specific gravity of the hardened product, modulus of elasticity, adhesion to different supports, shrinkage, behaviour in terms of water movement and resistance to freeze-thaw cycles. Tests used to evaluate concrete durability were also adapted for application in mortar containing natural hydraulic lime and well-defined procedures were established. These tests included chloride penetration, resistivity and expansion due to alkali-silica reaction (ASR).

Industrial mortar proved to perform better than traditional mortar in terms of compressive strength at different ages, specific gravity of the hardened product, presenting values within the standard limits for renovation renders and good behaviour in terms of water movement. Furthermore, industrial mortar showed to be more resistant to freeze/thaw cycles compared to traditional mortar. In terms of flexural resistance industrial mortar exceeded recommended values. Both mortars presented higher adhesion strength than established limits. Durability tests proved applicable to both mortars types.

KEYWORDS: rehabilitation, industrial mortar, traditional mortar, natural hydraulic lime, durability

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. REABILITAÇÃO	1
1.1.1. REABILITAÇÃO URBANA	1
1.1.2. REABILITAÇÃO DE EDIFÍCIOS	1
1.1.2.1. Estrutura de edifícios urbanos em Portugal	2
1.1.2.2. Edifícios Antigos	3
1.1.2.3. Edifícios Recentes	7
1.1.3. REABILITAÇÃO DE REVESTIMENTOS	9
1.1.3.1. Exigências para revestimentos a aplicar em edifícios antigos, Veiga (2006a)	10
1.2. ARGAMASSAS	12
1.2.1. CONCEITO DE ARGAMASSA	12
1.2.2. CARACTERÍSTICAS DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO	12
1.2.2.1. Argamassas tradicionais	13
1.2.2.2. Argamassas industriais	15
1.2.3. MATÉRIAS-PRIMAS DAS ARGAMASSAS	17
1.2.3.1. Agregados	17
1.2.3.2. Ligantes	17
1.2.3.3. Água de amassadura	20
1.2.4. LEGISLAÇÃO PARA AS ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO	21
1.3. A CAL HIDRÁULICA NA REABILITAÇÃO DE REVESTIMENTOS	21
1.4. OBJETIVOS E ORGANIZAÇÃO DO PLANO DE TRABALHOS	22
1.5. BIBLIOGRAFIA	23

2. ESTADO DA ARTE DA CAL HIDRÁULICA NATURAL	25
2.1. ENQUADRAMENTO HISTÓRICO	25
2.2. A CAL	27
2.3. A CAL HIDRÁULICA NATURAL EM PORTUGAL	27

2.3.1. CONSTITUIÇÃO	27
2.3.2. PRODUÇÃO	28
2.4. DIFERENÇA ENTRE CAL HIDRÁULICA NATURAL, SEGUNDO A NP EN 459	31
2.5. ARGAMASSAS À BASE DE CAL HIDRÁULICA NATURAL	31
2.5.1. MASSA VOLÚMICA	33
2.5.2. RESISTÊNCIAS MECÂNICAS	34
2.5.3. MÓDULO DE ELASTICIDADE	34
2.5.4. ADERÊNCIA A DIFERENTES SUPORTES.....	34
2.5.5. COMPORTAMENTO FACE À AÇÃO DA ÁGUA.....	35
2.5.5.1. Capilaridade e permeabilidade ao vapor.....	36
2.5.5.2. Porosidade acessível à água	36
2.5.6. CICLOS DE GELO/DEGELO.....	36
2.5.7. RETRAÇÃO	37
2.5.8. RESISTÊNCIA AOS SAIS.....	37
2.6. BIBLIOGRAFIA	38
 3. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	 41
3.1. INTRODUÇÃO	41
3.1.1. CAMADAS CONSTITUINTES DE UM REBOCO	42
3.1.2. CLASSIFICAÇÃO DAS ARGAMASSAS SEGUNDO A NP EN 998-1	43
3.1.3. ARGAMASSA INDUSTRIAL.....	44
3.1.4. ARGAMASSA TRADICIONAL.....	45
3.1.5. PROCESSO DE AMASSADURA DAS ARGAMASSAS E PROCESSO DE FABRICO DOS PROVETES.....	46
3.2. ENSAIOS REALIZADOS	46
3.2.1. PRODUTO INDUSTRIAL E MISTURAS EM SECO	46
3.2.1.1. Granulometria das areias, do produto industrial e das misturas em seco	46
3.2.1.2. Baridade	50
3.2.2. PRODUTO EM PASTA.....	51
3.2.2.1. Água de amassadura, trabalhabilidade e espalhamento	51
3.2.2.2. Ar contido	55
3.2.2.3. Massa volúmica	56
3.2.2.4. Tempo de vida útil.....	56
3.2.3. PRODUTO ENDURECIDO	58

3.2.3.1. Resistência mecânica.....	58
3.2.3.2. Massa volúmica do produto endurecido e condutibilidade térmica.....	60
3.2.3.3. Módulo de elasticidade do produto endurecido.....	62
3.2.3.4. Aderência a diferentes suportes – bloco e tijolo.....	63
3.2.3.5. Comportamento face à ação da água	66
3.2.3.6. Características após ciclos de gelo/degelo	75
3.2.3.7. Retração	81
3.3. BIBLIOGRAFIA	82

4. NOVOS DESENVOLVIMENTOS

4.1. INTRODUÇÃO	85
4.2. ENSAIOS REALIZADOS	85
4.2.1. RESISTIVIDADE	85
4.2.1.1. Introdução.....	85
4.2.1.2. Procedimento experimental.....	86
4.2.2. RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE SAIS - CLORETOS.....	92
4.2.2.1. Introdução.....	92
4.2.2.2. Procedimento experimental.....	92
4.2.3. REATIVIDADE ÁLCALIS-SÍLICA	100
4.2.3.1. Introdução.....	100
4.2.3.2. Procedimento experimental.....	101
4.3. BIBLIOGRAFIA	104

5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....

5.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	105
5.2. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	105
5.2.1. PRODUTO INDUSTRIAL E MISTURAS EM SECO.....	105
5.2.2. PRODUTO EM PASTA	105
5.2.2.1. Água de amassadura, trabalhabilidade e espalhamento	105
5.2.2.2. Ar contido.....	106
5.2.2.3. Massa volúmica	106
5.2.2.4. Tempo de vida útil	107
5.2.3. PRODUTO ENDURECIDO	107

5.2.3.1. Resistência mecânica	107
5.2.3.2. Massa volúmica do produto endurecido e condutibilidade térmica	109
5.2.3.3. Módulo de elasticidade	109
5.2.3.4. Aderência a diferentes suportes	110
5.2.3.5. Comportamento face à ação da água	110
5.2.3.6. Características após ciclos de gelo/degelo	112
5.2.3.7. Retração	115
5.3. NOVOS DESENVOLVIMENTOS	116
5.3.1. RESISTIVIDADE	116
5.3.2. RESISTÊNCIA AOS SAIS - CLORETOS	119
5.3.3. REATIVIDADE ÁLCALIS-SÍLICA	119
5.4. BIBLIOGRAFIA	121

6. CONCLUSÕES	123
6.1. INTRODUÇÃO	123
6.2. NOVOS PROCEDIMENTOS DOS ENSAIOS ADAPTADOS	123
6.2.1. RESISTIVIDADE	123
6.2.2. RESISTÊNCIA AOS SAIS - CLORETOS	124
6.2.3. REATIVIDADE ÁLCALI-SÍLICA	124
6.3. CONCLUSÕES DOS RESULTADOS OBTIDOS	125
6.4. CONCLUSÕES FINAIS	127
6.5. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	128
6.6. BIBLIOGRAFIA	129

ANEXOS

ANEXO A – ESPALHAMENTO DAS ARGAMASSAS

ANEXO B – MASSA VOLÚMICA DAS ARGAMASSAS AOS 28 DIAS APÓS CICLOS GELO/DEGELO

ANEXO C – MÓDULO DE ELASTICIDADE DAS ARGAMASSAS AOS 28 DIAS E APÓS CICLOS GELO/DEGELO

ANEXO D – RESISTÊNCIAS MECÂNICAS DA ARGAMASSA INDUSTRIAL NAS DIFERENTES IDADES E APÓS CICLOS DE GELO/DEGELO

ANEXO E - RESISTÊNCIAS MECÂNICAS DA ARGAMASSA TRADICIONAL NAS DIFERENTES IDADES E APÓS CICLOS DE GELO/DEGELO

ANEXO F – RETRAÇÃO DA ARGAMASSA INDUSTRIAL

ANEXO G – RETRAÇÃO DA ARGAMASSA TRADICIONAL

ANEXO H – ADERÊNCIA A DIFERENTES SUPTES DA ARGAMASSA INDUSTRIAL

ANEXO I – ADERÊNCIA A DIFERENTES SUPTES DA ARGAMASSA TRADICIONAL

ANEXO J – ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE

ANEXO L – POROSIDADE ACESSÍVEL À ÁGUA

ANEXO M – PERMEABILIDADE AO VAPOR DA ARGAMASSA INDUSTRIAL

ANEXO N – PERMEABILIDADE AO VAPOR DA ARGAMASSA TRADICIONAL

ANEXO O – ASR DA ARGAMASSA INDUSTRIAL

ANEXO P – ASR DA ARGAMASSA TRADICIONAL COM AREIA CEN

ANEXO Q – ASR DA ARGAMASSA TRADICIONAL

ANEXO R – RESISTIVIDADE – SÉRIE 1

ANEXO S – RESISTIVIDADE – SÉRIE 2

ANEXO T – RESISTIVIDADE – SÉRIE 3

ANEXO U – RESISTIVIDADE NO ENSAIO DE PENETRAÇÃO POR CLORETOS DA ARGAMASSA TRADICIONAL

ANEXO V – RESISTIVIDADE NO ENSAIO DE PENETRAÇÃO POR CLORETOS DA ARGAMASSA INDUSTRIAL

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1.1 – Edifício de estrutura gaioleiro, (LNEC, 2005).....	3
Fig. 1.2 – Edifício classificado, Chafariz d'El-Rei em Lisboa (Lisboa, 2008)	4
Fig. 1.3 – Edifícios não classificados, Leiria, (Coito, 2014)	4
Fig. 1.4 – Estrutura de betão degradada, J. Sousa Coutinho	8
Fig. 1.5 – Estrutura de betão degradada, J. Sousa Coutinho	8
Fig. 1.6 – Comparação entre a fissuração de um revestimento numa única camada e um reboco multicamada, Veiga (2006a)	9
Fig. 1.7 – Representação esquemática do funcionamento de um revestimento multicamada no que se refere à deformação e ao transporte de água, Veiga (2011).....	10
Fig. 1.8 – Preparação manual de argamassa, Mascarenhas (2004).....	13
Fig. 1.9 – Preparação de argamassa com betoneiras mecânicas, Mascarenhas (2004).....	14
Fig. 1.10 - Doseamento das argamassas secas, APFAC (2007).....	17
Fig. 1.11 - Evolução da resistência à compressão do cimento portland ao longo dos anos, (Secil, 2014).....	20
Fig. 2.1 – História das argamassas: linha do tempo, Almeida (2010).....	26
Fig. 2.2 – Pedreira	28
Fig. 2.3 – Exclusão da fração de argila	28
Fig. 2.4 – Britador	28
Fig. 2.5 – Tapete que transporta carvão	28
Fig. 2.6 – Tapete que transporta a pedra calcária	29
Fig. 2.7 – Local de junção da pedra com o carvão	29
Fig. 2.8 - Temperatura ideal na produção de cal hidráulica natural, (Secil, 2014a)	30
Fig. 2.9 – Pedra calcária cozida antes de hidratação	30
Fig. 2.10 - Câmara de hidratação	30
Fig. 2.11 – Mecanismo de aderência mecânica de um revestimento, Veiga (1998).....	35
Fig. 2.12 – Patologia da degradação por sais, Puim, Gonçalves e Brito (2012)	38
Fig. 3.1 – Camadas constituintes do revestimento exterior em argamassa, Mascarenhas (2006)	43
Fig. 3.2 – Mistura da argamassa em seco	46
Fig. 3.3 – Divisão em duas partes da argamassa em seco	46
Fig. 3.4 – Divisão em quatro partes da argamassa em seco	47
Fig. 3.5 – Exclusão dos quartos diagonais.....	47
Fig. 3.6 – Aparelho de peneiração mecânica	47
Fig. 3.7 – Curva granulométrica das areias utilizadas	47

Fig. 3.8 – Curva granulométrica do produto industrial.....	48
Fig. 3.9 – Curva granulométrica do produto industrial e das misturas em seco	48
Fig. 3.10 – Curva granulométrica da argamassa tradicional 3 com traço 1:2,2	49
Fig. 3.11 – Curva granulométrica da argamassa tradicional 3 com traço 1:2,5	49
Fig. 3.12 – Curva granulométrica da argamassa tradicional 3 com traço 1:3	50
Fig. 3.13 – Recipiente para a determinação da baridade e areia	50
Fig. 3.14 – Pá utilizada no enchimento do recipiente	50
Fig. 3.15 – Nivelamento da areia com régua metálica.....	51
Fig. 3.16 – Pesagem do recipiente com areia.....	51
Fig. 3.17 – Argamassa industrial em pasta.....	52
Fig. 3.18 – Instrumentos utilizados no ensaio de espalhamento	53
Fig. 3.19 – Utilização do paquímetro no ensaio de espalhamento	53
Fig. 3.20 – Argamassa 1 em estado fresco	53
Fig. 3.21 - Argamassa 2 em estado fresco	54
Fig. 3.22 – Argamassa 3 em estado fresco	54
Fig. 3.23 – Aparelho de medição de teor em ar para argamassas de acordo com EN 1015-7	55
Fig. 3.24 – Equipamento para a determinação do tempo de vida útil e balança.....	57
Fig. 3.25 – Instrumento que perfura a argamassa	57
Fig. 3.26 – Medição da resistência à penetração	57
Fig. 3.27 – Provete de argamassa após ensaio.....	57
Fig. 3.28 – Ensaio à flexão aos 28 dias de idade	58
Fig. 3.29 – Resultados obtidos no ensaio de resistência à flexão	59
Fig. 3.30 – Ensaio à compressão aos 7 dias de idade	60
Fig. 3.31 – Resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão	60
Fig. 3.32 – Equipamento para medição da velocidade de propagação de ultrassons	63
Fig. 3.33 – Provetes utilizados no ensaio da massa volúmica e posteriormente utilizados no ensaio do módulo de elasticidade.....	63
Fig. 3.34 – Determinação do tempo de transmissão de onda do provete	63
Fig. 3.35 – Calibração do pundit lab	63
Fig. 3.36 – Suporte de tijolo cerâmico.....	64
Fig. 3.37 – Suporte em bloco de argamassa cimentícia.....	64
Fig. 3.38 – Colocação de cola no provete.....	64
Fig. 3.39 – Colocação dos discos no provete	64
Fig. 3.40 – Equipamento de tração uniaxial vertical	64

Fig. 3.41 – Provete com argamassa industrial após ensaio de aderência ao bloco	65
Fig. 3.42 – Provete com argamassa tradicional após ensaio de aderência ao bloco	65
Fig. 3.43 – Provete com argamassa industrial após ensaio de aderência ao tijolo	65
Fig. 3.44 – Provete com argamassa tradicional após ensaio de aderência ao tijolo	66
Fig. 3.45 – Molde com papel de filtro para o ensaio de capilaridade	66
Fig. 3.46 – Molde com papel de filtro para o ensaio de capilaridade	67
Fig. 3.47 – Representação esquemática das faces onde se coloca parafina (faces preenchidas)	67
Fig. 3.48 – Suportes dos provetes do ensaio de capilaridade	67
Fig. 3.49 – Provetes no decorrer do ensaio de capilaridade	68
Fig. 3.50 – Provetes de argamassa (Figura 1 da EN 1015-18)	68
Fig. 3.51 – Provetes de argamassa industrial partidos após ensaio de capilaridade	68
Fig. 3.52 – Medição da profundidade de penetração de água nos provetes de argamassa industrial	68
Fig. 3.53 – Provetes de argamassa tradicional partidos após ensaio de capilaridade	68
Fig. 3.54 – Variação de peso ao longo do ensaio de capilaridade	69
Fig. 3.55 – Suporte de betão celular autoclavado	70
Fig. 3.56 – Anéis metálicos sobre a gaze no betão celular autoclavado	70
Fig. 3.57 – Colocação da argamassa para a produção dos provetes	70
Fig. 3.58 – Medição da espessura do provete de permeabilidade ao vapor de água	71
Fig. 3.59 – Copo de ensaio de permeabilidade ao vapor de água	71
Fig. 3.60 – Copo de ensaio com o provete	71
Fig. 3.61 – Gráfico do ensaio de permeabilidade ao vapor da argamassa industrial	72
Fig. 3.62 – Gráfico do ensaio de permeabilidade ao vapor da argamassa tradicional	72
Fig. 3.63 – Molde utilizado na fabricação dos provetes	73
Fig. 3.64 – Equipamento utilizado nas pesagens dos provetes	74
Fig. 3.65 – Pesagem hidrostática	74
Fig. 3.66 – Pesagem do provete	74
Fig. 3.67 – Câmara utilizada na congelação dos provetes e termómetro para medir a temperatura do interior da mesma	76
Fig. 3.68 – Recipientes com água e com os provetes no interior da câmara de ambiente controlado	76
Fig. 3.69 – Provete de argamassa tradicional fissurado ao fim de 3 ciclos	77
Fig. 3.70 – Provete de argamassa tradicional partido dentro de água	77
Fig. 3.71 – Interior do provete partido de argamassa tradicional após 3 ciclos de gelo/degelo	78

Fig. 3.72 – Provetes de argamassa industrial (à esquerda) e provetes de argamassa tradicional (à direita) após 4 ciclos de gelo/degelo.....	78
Fig. 3.73 – Provetes de argamassa industrial (à esquerda) e provetes de argamassa tradicional (à direita) após 5 ciclos de gelo/degelo.....	78
Fig. 3.74 – Provetes para o ensaio de aderência após 5 ciclos de gelo/degelo.....	78
Fig. 3.75 – Ensaio de compressão a provetes de argamassa tradicional após 5 ciclos de gelo/degelo.....	80
Fig. 3.76 – Provetes após ensaio de aderência sujeitos a 5 ciclos de gelo/degelo (argamassa industrial em cima e argamassa tradicional em baixo)	81
Fig. 3.77 – Provede para medição da retração.....	81
Fig. 3.78 – Resultados obtidos no ensaio de retração.....	82
Fig. 4.1 – Colocação da rede metálica na argamassa	87
Fig. 4.2 – Compactação da argamassa após colocação da rede metálica.....	87
Fig. 4.3 – Provetes de argamassa industrial ainda no molde.....	87
Fig. 4.4 – Provetes de argamassa industrial para o ensaio da resistividade	87
Fig. 4.5 – Provetes de argamassa tradicional para o ensaio da resistividade	87
Fig. 4.6 – Medição da resistividade através da rede metálica inserida nos provetes	87
Fig. 4.7 – Medição da resistividade em provetes de argamassa industrial.....	87
Fig. 4.8 – Provetes de argamassa tradicional (à esquerda) e provetes de argamassa industrial (à direita).....	88
Fig. 4.9 – Medição da resistividade com recurso a chapas metálicas	89
Fig. 4.10 – Resultados obtidos para a série 1. Resistividade a partir dos 31 dias em provetes com 28 dias de processo de cura e posteriormente saturados e mantidos imersos desde os 29 dias (Medição com redes a 5 mm dos topos na argamassa tradicional e à face na industrial	90
Fig. 4.11 – Resultados obtidos para a série 2. Resistividade ao longo do processo de cura de provetes com rede metálica embebida a 5 mm dos topos (provetes de argamassa industrial inviabilizados).....	91
Fig. 4.12 – Resultados obtidos para a série 3. Resistividade aos 8 dias (período de cura). Medição com placas metálicas	91
Fig. 4.13 – Molde utilizado na fabricação dos provetes.....	92
Fig. 4.14 – Argamassa na base do molde após início da desmoldagem	93
Fig. 4.15 – Provetes deteriorados após desmoldagem	93
Fig. 4.16 – Provetes deteriorados após desmoldagem	93
Fig. 4.17 – Provetes no molde metálico.....	94
Fig. 4.18 – Retirada da folha de acetato do provete.....	94
Fig. 4.19 – Retirada da folha de acetato da base do provete	94

Fig. 4.20 – Provete após desmoldagem	94
Fig. 4.21 – Provete antes de serem submetidos ao procedimento de saturação	94
Fig. 4.22 – Provete sujeito ao vácuo	94
Fig. 4.23 – Colocação da solução saturada de hidróxido de cálcio dentro da câmara	95
Fig. 4.24 – Envolvimento dos provetes experimentais em fita-cola	95
Fig. 4.25 – Medição do provete com o paquímetro para verificar se o diâmetro desejado fora atingido	95
Fig. 4.26 – Provete durante a aplicação de corrente elétrica	96
Fig. 4.27 – Células de ensaio	96
Fig. 4.28 – Representação esquemática da direção de corte dos provetes	96
Fig. 4.29 – Provete exposto à luz.....	97
Fig. 4.30 – Provete experimental de argamassa industrial após pulverização de nitrato.....	97
Fig. 4.31 – Provete experimental de argamassa tradicional após pulverização de nitrato.....	97
Fig. 4.32 – Colocação de água nas células para verificar a sua estanquidade	98
Fig. 4.33 – Provete de argamassa tradicional fissurado na célula	98
Fig. 4.34 – Provete degradado após desmontado da célula, antes do ensaio (face cofrada)	98
Fig. 4.35 – Provete degradado após desmontado da célula, antes do ensaio, (face não cofrada)	98
Fig. 4.36 – Serragem dos provetes.....	98
Fig. 4.37 – Provete de argamassa industrial após pulverização com nitrato de prata e exposto à luz fluorescente	99
Fig. 4.38 – Provete de argamassa tradicional após pulverização com nitrato de prata e exposto à luz fluorescente	99
Fig. 4.39 – Medição da profundidade de penetração de cloretos nos provetes de argamassa tradicional	99
Fig. 4.40 – Provete experimental de argamassa tradicional.....	101
Fig. 4.41 – Provete experimental de argamassa tradicional.....	101
Fig. 4.42 – Composição da areia normalizada	101
Fig. 4.43 – Molde utilizado na fabricação dos provetes para o ensaio ASR	102
Fig. 4.44 – Provete realizado para o ensaio ASR	102
Fig. 4.45 – Provete em água.....	103
Fig. 4.46 – Calibração do equipamento	103
Fig. 4.47 – Leitura inicial do provete	103
Fig. 5.1 – Evolução da massa volúmica ao longo dos ciclos de gelo/degelo	112
Fig. 5.2 – Evolução do módulo de elasticidade após ciclos de gelo/degelo	113
Fig. 5.3 - Resultados obtidos no ensaio de retração.....	116

Fig. 5.4 - Resultados conjuntos da resistividade.....	118
Fig. 5.5 - Resultados obtidos no ensaio de reatividade potencial aos álcalis	120

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Relação ente as características recomendadas para as argamassas e as características dos elementos preexistentes – características mecânicas, LNEC (2006).....	32
Tabela 2.2 – Relação entre as características recomendadas para as argamassas e as características dos elementos preexistentes – características não mecânicas, LNEC (2006).....	32
Tabela 2.3 – Requisitos estabelecidos para as características mecânicas das argamassas de revestimento para edifícios antigos, Veiga (2003b)	33
Tabela 2.4 – Requisitos estabelecidos para as características de comportamento face à ação da água e ao clima das argamassas de revestimento para edifícios antigos, Veiga (2003b)	33
Tabela 3.1 – Resultados do ensaio da baridade	51
Tabela 3.2 – Resultados obtidos nos ensaios	54
Tabela 3.3 – Resultados obtidos no ensaio de ar contido	55
Tabela 3.4 – Resultados obtidos no ensaio de massa volúmica	56
Tabela 3.5 – Resultados obtidos no ensaio de tempo de vida útil	58
Tabela 3.6 – Resultados obtidos no ensaio de massa volúmica do produto endurecido	61
Tabela 3.7 – Condutibilidade térmica para argamassas de alvenaria e argamassas de reboco (Quadro A.12, NP EN 1745)	61
Tabela 3.8 – Resultados obtidos para a condutibilidade térmica	61
Tabela 3.9 – Resultados obtidos no ensaio do módulo de elasticidade	63
Tabela 3.10 – Resultados obtidos no ensaio de aderência ao bloco	65
Tabela 3.11 – Resultados obtidos no ensaio de aderência ao tijolo	65
Tabela 3.12 – Resultados obtidos no ensaio de capilaridade	69
Tabela 3.13 – Resultados do ensaio de permeabilidade ao vapor de água	73
Tabela 3.14 – Resultados obtidos no ensaio de porosidade acessível à água	75
Tabela 3.15 – Resultados obtidos para a massa volúmica após ciclos de gelo/degelo	79
Tabela 3.16 – Resultados obtidos para o módulo de elasticidade após ciclos de gelo/degelo	79
Tabela 3.17 – Resultados obtidos para resistência à flexão em MPa após ciclos de gelo/degelo	79
Tabela 3.18 – Resultados obtidos para resistência à compressão após ciclos de gelo/degelo	80
Tabela 3.19 – Resultados obtidos no ensaio de aderência após 5 ciclos de gelo/degelo	80
Tabela 4.1 – Resultados obtidos no ensaio de penetração de iões cloretos	99
Tabela 4.2 – Resultados obtidos no ensaio à reatividade álcalis-sílica	104
Tabela 5.1 – Água de amassadura e ar contido das argamassas	106
Tabela 5.2 – Água de amassadura e massa volúmica das argamassas	107
Tabela 5.3 – Evolução da resistência à flexão durante os ciclos de gelo/degelo	108

Tabela 5.4 – Evolução da resistência à compressão das argamassas	109
Tabela 5.5 - Evolução da resistência à flexão durante os ciclos de gelo/degelo	114
Tabela 5.6 - Evolução da resistência à compressão durante os ciclos de gelo/degelo	114
Tabela 5.7 – Evolução da tensão de aderência após os ciclos de gelo/degelo	115
Tabela 6.1 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios Novos Desenvolvimentos	125
Tabela 6.2 – Resumo dos resultados obtidos no programa experimental	125

SÍMBOLOS

c – capacidade calorífica específica

E_d – módulo de elasticidade dinâmico

ε - volume de poros acessível à água

$f\psi$ – coeficiente de conversão da humidade

HR – humidade relativa

$M_{\text{água}}$ – massa hidrostática do provete saturado

M_{ar} – massa do provete saturado

M_{seco} – massa do provete seco

W_p – permeabilidade ao vapor de água

Λ – permeância ao vapor de água

$\lambda_{10,\text{seco}}$ – condutibilidade térmica no estado seco a uma temperatura média de 10 °C

μ – coeficiente de difusão de vapor de água

$\rho_{\text{água}}$ – massa volúmica da água

ACRÓNIMOS

A.C. – antes de Cristo

ASR – Reação álcalis-sílica

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ – hidróxido de cálcio

CaCO_3 – carbonato de cálcio

Cal – calorias

CaO – óxido de cálcio

CEN - Comité Européu de Normalização

CO_2 – dióxido de carbono

H – horas

H_2O – água

K_2O – óxido de potássio

KPa - quilo Pascal

LABEST – Laboratório da Tecnologia do Betão e do Comportamento Estrutural

LEMC – Laboratório de Engenharia de Materiais de Construção

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

mBar – milibar

Min - Minutos

MPa – Mega Pascal

N.E. – não especificado

N.R. – não realizado

Na₂O – óxido de sódio

NaOH – hidróxido de sódio

°C – graus centígrados

P – percentual da população

V - volts

1

INTRODUÇÃO

1.1. REABILITAÇÃO

1.1.1. REABILITAÇÃO URBANA

Segundo Paiva, Aguiar e Pinho (2006) o conceito de reabilitação urbana surge devido à preocupação em preservar o património cultural. Esta preocupação deveu-se ao facto de o conceito de património, a partir da década de 60, passar a abranger edifícios urbanos e rurais e os seus contextos paisagísticos e ambientais.

Após a II Grande Guerra, observou-se uma crescente degradação e sobreocupação das áreas urbanas. Para combater esta tendência, e também como justificação, foram realizadas demolições em massa dessas áreas levando à perda de bens patrimoniais com importante valor, (Paiva, Aguiar e Pinho, 2006).

Verificada a importância em preservar o património existente surgiu o conceito de conservação integrada que defende as áreas urbanas de medidas como as anteriormente tomadas, uma vez que após a perda de património não é mais possível recuperá-lo.

Segundo a Carta Europeia do Património Arquitetónico, citação 28, artigo 7º por tradução livre, “a conservação integrada não exclui a introdução de arquitetura contemporânea em áreas que contenham edifícios antigos, desde que o contexto existente, as proporções, as formas, a disposição dos volumes, e a escala sejam integralmente respeitados”, (Paiva, Aguiar e Pinho, 2006).

Neste sentido, pode-se definir a reabilitação urbana como a integração de monumentos e edifícios antigos através da renovação e adaptação da estrutura interna às necessidades atuais, sem pôr de lado a preservação dos elementos com valor atual, (Paiva, Aguiar e Pinho, 2006).

Assim, na reabilitação urbana há que ter em conta todos os aspetos ligados aos edifícios existentes e a sua integração no meio envolvente, melhorando as suas condições mas tentando não correr o risco de o descaracterizar perdendo assim elementos patrimoniais importantes.

1.1.2. REABILITAÇÃO DE EDIFÍCIOS

Na Europa, e em particular em Portugal, os edifícios antigos tinham como matérias-primas a pedra, a cal e a madeira, assumindo estes materiais um papel fundamental na reabilitação do património monumental e dos edifícios antigos, (Freitas, 2012).

A reabilitação tem como objetivo a recuperação dos valores preexistentes numa dada edificação histórica (ou não) aliado a melhorias funcionais dos mesmos, Paiva, Aguiar e Pinho (2006). Além disto, surge como uma forma de reutilizar as arquiteturas existentes, elementos construtivos e estruturais dos

edifícios antigos, por forma a adaptá-los às exigências e necessidades atuais, mas evitando ao máximo a perda da essência do edifício, (Paiva, Aguiar e Pinho, 2006).

Através da ideia da “Reabilitação” surgiu o “Fachadismo” que consiste na preservação das paredes exteriores e a demolição das partes interiores dos edifícios antigos e a sua substituição por novas construções. Deste modo, o edifício sofre assim profundas mudanças tipológicas, volumétricas, estruturais e construtivas, onde as antigas fachadas são preservadas ou reconstruídas imitando as antigas (Paiva, Aguiar e Pinho, 2006).

Freitas (2012) defende a mesma ideia de Paiva, Aguiar e Pinho (2006) acrescentado que um projeto de reabilitação deve entender o edifício como um todo e não como o somatório de partes, onde algumas consideradas com maior valor se procuram manter, como as fachadas, e outras demolir.

Roders, Post e Erkelens (2006) têm outra visão da reabilitação referindo que esta é consciente do ciclo de vida do edifício quando respeita e considera em projeto as três temporalidades: o passado, o presente e o futuro.

O passado é considerado quando o projetista planeia a preservação, reutilização ou reciclagem da preexistência o mais possível. Neste sentido, deve-se planejar a utilização e/ou destino de todos os espaços, elementos ou materiais. O presente é considerado quando o projetista planeia melhorias na envolvente, no edifício e no seu valor cultural com o objetivo de atingir na nova existência os níveis de conforto e economia essenciais para a vida atualmente. Por fim, o futuro é considerado quando o projetista planeia as adições da nova existência, baseado na compatibilidade das características entre as subsistentes e as adições, (Roders, Post e Erkelens, 2006).

Assim, este tipo de reabilitação permite ao projetista a redução da percentagem de resíduos da construção, no final da intervenção de reabilitação, (Roders, Post e Erkelens, 2006).

Segundo Cóias (2006) os edifícios podem dividir-se em dois grandes grupos consoante a época de construção: edifícios recentes cujo ano de construção é posterior à década de 50 do século XX e edifícios antigos cujo ano de construção é anterior à década de 50 do século XX.

1.1.2.1. Estrutura de edifícios urbanos em Portugal

Os principais tipos de estruturas de edifícios antigos urbanos em Portugal são os edifícios pombalinos, gaioleiros e edifícios “de placa”, (Cóias, 2006).

Os edifícios pombalinos possuem uma geometria regular de paredes principais de alvenaria de pedra de razoável qualidade, paredes interiores em frontal pombalino, pisos de madeira, exceto o primeiro, que é, nos edifícios de melhor qualidade constituído por abobadas de tijoleira. Este tipo de edifícios possui ainda dispositivos de ligação conferindo um razoável contraventamento. Esta estrutura foi aplicada durante os séculos XVIII e XIX, (Cóias, 2006).

A estrutura “gaioleiros”, como se pode ver na Figura 1.1, possui paredes de alvenaria de pedra de razoável ou má qualidade ou de alvenaria de tijolo maciço, divisórias em tabique de tábuas ao alto e pisos de madeira. Quanto ao sistema de contraventamento este é deficiente. Esta estrutura foi utilizada no final do século XIX até aos anos 30 a 40, (Cóias, 2006).



Figura 1.1 - Edifício de estrutura gaioleiro, (LNEC, 2005)

Os edifícios “de placa” são edifícios constituídos por paredes de alvenaria de pedra e de tijolo e lajes de betão armado, surgindo após o período “gaioleiro”, entre os anos 30 e os 50.

1.1.2.2. Edifícios Antigos

Com base nas afirmações de Freitas (2012) os edifícios antigos são todos os que foram construídos antes da utilização generalizada de estruturas de betão armado, estruturas muito frequentes a partir da segunda guerra mundial.

O mesmo autor divide os edifícios antigos em três categorias: património monumental, património edificado classificado e património edificado corrente. Pelo seu valor cultural, o património monumental requer uma abordagem onde é necessário preservar as técnicas construtivas tradicionais, as intervenções terão de ser reversíveis e não intrusivas, sendo privilegiada a conservação face às exigências para com o edifício.

Cóias (2006) opta por uma divisão diferente dos edifícios antigos, afirmando que os mesmos podem ser divididos quanto à sua função, nomeadamente: militares, religiosos e civis, onde dentro do grupo de edifícios civis podem-se subdividir em habitações nobres como palácios, solares, etc.; e habitações correntes, como construções urbanas.

Os edifícios classificados, como o que se encontra na Figura 1.2, estão mais protegidos de atos de reabilitação que qualquer outro edifício corrente, pois possuem valor cultural, que funciona como escudo de proteção, se não para o edifício todo, para alguns elementos relevantes, (Rodgers, Post e Erkelens, 2006).



Figura 1.2 - Edifício classificado, Chafariz d'El-Rei em Lisboa (Lisboa, 2008)

Em edifícios não classificados, como os que se apresentam na Figura 1.3, tem de partir dos intervenientes envolvidos na reabilitação, sejam eles arquitetos, construtores ou proprietários, uma posição ética coerente, pois frequentemente muitas intervenções não requerem sequer a aprovação por parte das entidades municipais, (Roders, Post e Erkelens, 2006).



Figura 1.3 - Edifícios não classificados, Leiria, (Coito, 2014)

De entre os edifícios recentes convém considerar, segundo a sua função, os edifícios como residenciais e não residenciais (comerciais, industriais, de administração, etc.), (Cóias, 2006).

Um edifício pode ser considerado dividido em quatro partes principais, (Cóias, 2006):

- Envolvente – local onde se encontra a habitação, do modo como o edifício se encontra posicionado e orientado e das características das áreas circundantes.
- Envelope – é a “pele” do edifício, o elemento que está diretamente exposto aos agentes de deterioração.
- Interiores – espaços interiores do edifício
- Estrutura e fundações – a estrutura é a parte do edifício que resiste às forças a que ele está sujeito e as fundações são as partes da construção que transmitem ao terreno o peso do edifício e a resultante das outras forças que sobre ele atuam.

Os tecidos históricos, especialmente os que se localizam nas áreas centrais das cidades, apresentam geralmente um conjunto de características potencialmente positivas e geradoras de dinâmicas sociais, económicas e culturais. É nestas áreas que se localizam edifícios e instituições civis e religiosas de grande importância, centros de negócios e finanças, instituições de âmbito cultural, monumentos e conjuntos edificados de valor histórico, artístico e identitário, (Paiva, Aguiar e Pinho, 2006).

Uma das mais-valias e um dos recursos mais importantes dos tecidos históricos são os edifícios que os constituem, pelo seu valor histórico, patrimonial, artístico, económico e de uso. No entanto, apesar do valor que possuem, estes edifícios apresentam geralmente uma série de problemas que lhes são inerentes ou que condicionam a sua reabilitação como a deterioração física e estrutural, inadequação funcional aos padrões atuais, deficientes condições de segurança e ausência de legislação nacional com níveis de exigências inferiores aos padrões correntes que enquadre as intervenções de reabilitação em edifícios antigos, (Paiva, Aguiar e Pinho, 2006).

O facto de um edifício ser antigo não o torna, necessariamente, menos apto. Há muita construção antiga de boa qualidade e uma reabilitação e beneficiação cuidadas podem dotar os edifícios antigos de excelentes condições de habitabilidade, conforto e segurança. Além disso, os edifícios antigos, adequadamente mantidos, dão atmosfera e carácter às cidades e aos bairros, (Cóias, 2006).

Constituição dos edifícios antigos

Considerando os edifícios antigos (pombalinos, gaioleiros, de placa) divididos em quatro partes, como Cóias (2006) refere, na envolvente dos edifícios antigos, estes estão dispostos em banda ou em quarteirões e há a existência de pátios estreitos e descobertos entre dois edifícios ou no interior dos edifícios.

O envelope é composto por paredes rebocadas e pintadas ou revestidas a azulejo, (Cóias, 2006). Estes edifícios possuem na sua constituição paredes laterais com dimensões importantes, geralmente sem janelas ou portas, aptas a receber outro edifício encostado, empenas. No que respeita aos interiores as divisórias são constituídas em tabique, que é uma parede leve de pequena espessura, para separar os compartimentos, e o seu revestimento é de estuque pintado.

A estrutura destas construções é constituída por paredes portantes de alvenaria de pedra ou de tijolo, os pisos e a estrutura da cobertura é de madeira, por vezes de vigas de ferro e de abobadilha ou betão armado, (Cóias, 2006).

As fundações são constituídas por sapatas corridas, de alvenaria, ou pegões e arcos do mesmo material, (Cóias, 2006). Pode-se considerar que a largura e profundidade determinada para as fundações estão diretamente dependentes das qualidades do terreno onde se implanta o edifício. As fundações alcançam profundidades muito reduzidas quando se encontram sobre afloramentos rochosos. No entanto, quando o terreno é de baixa resistência e compacidade (como acontece na proximidade dos cursos de água) as fundações assentam sobre estacaria de madeira, (Freitas, 2012).

Caracterização dos edifícios antigos

Um elemento utilizado desde longa data na construção de paredes de alvenaria, é o tijolo. Outro elemento constituinte da alvenaria é a argamassa. As argamassas são utilizadas nas alvenarias para duas finalidades: assentamento e revestimento. A função da argamassa de assentamento é, sobretudo, o preenchimento dos espaços entre as pedras criando uma base uniforme e evitando a necessidade de um “aparelho” mais dispendioso. As argamassas de cal e areia são comuns em paredes de construções

antigas, com adição ou não dos componentes com propriedades hidráulicas. As suas propriedades eram por vezes melhoradas com a adição de compostos orgânicos como sebo, borras de azeite, entre outras, com o fim de lhes conferir impermeabilidade, (Cóias, 2006).

Em construções de menor qualidade, a argamassa de cal surge, frequentemente substituída por uma mistura de saibro ou barro e cal ou até mesmo só por barro. Tal é o caso da construção tradicional em zonas onde o calcário não está presente. Nestas alvenarias, a menor resistência do ligante origina uma menor resistência das paredes, quer às ações verticais, quer às horizontais, como demonstra o deficiente comportamento que, nos Açores e noutras regiões do País, elas têm apresentado face a abalos sísmicos, (Cóias, 2006).

A deterioração da alvenaria tem a sua origem quer na deterioração dos materiais que a constituem, quer na degradação da sua estrutura, (Cóias, 2006).

As paredes antigas, porosas, espessas e sem cortes de capilaridade, absorviam água a partir das fundações, que subia por capilaridade ascendente e ia impregnando a parede durante os períodos mais húmidos, mas evaporava facilmente para o exterior, através dos revestimentos de cal, assim que as condições climáticas o permitiam. Podiam deste modo manter um equilíbrio hídrico razoável, conservando-se em boas condições durante séculos, (Veiga, 2006b).

Ao substituir os revestimentos de cal, permeáveis à água mas também favorecendo uma secagem rápida, por revestimentos de menor permeabilidade, como os rebocos de cimento, os revestimentos sintéticos e os materiais hidrofugados, altera-se todo esse equilíbrio, (Veiga, 2006b). De facto, consegue-se evitar a penetração da água através do revestimento, mas mantém-se a infiltração pelas fundações e, eventualmente, por outros pontos da fachada, como os vãos e as platibandas; esta água fica retida na interface com o revestimento pouco permeável ao vapor, ou no interior da parede, deteriorando-a, (Veiga, 2006b).

Legislação para os edifícios antigos

Ornelas, Guedes e Vásquez (2012) citam Fianchini & Fontana (2010); Paiva et.al (2006); Roders et al. (2007) sobre a degradação do património edificado. Este é um fenómeno visível em muitos dos centros históricos e urbanos das cidades. Uma adequada ação de conservação e manutenção do património edificado deve promover a sua máxima preservação e a melhoria das condições que esse património oferece à sua utilização.

Os mesmos autores citam novamente Fianchini & Fontana (2010), que sustentam que a legislação desencadeia uma avaliação fragmentada, consequência dos regulamentos locais que estabelecem restrições, ou têm uma visão demasiado simplista na aplicação a edifícios antigos. Estes afirmam ainda que os edifícios antigos possuem características materiais e tipológicas que permitem um melhor controlo do conforto térmico e trazem vantagens ambientais. Os códigos de construção e saúde necessitam de se reajustar às especificidades estruturais, construtivas, materiais e espaciais dos edifícios antigos, de modo a promover uma melhor qualidade dos espaços e garantir uma maior preservação das pré-existências e aproveitamento dos recursos existentes.

Ornelas, Guedes e Vásquez (2012) citam também García-Martínez et al. (2010) que destacam que os edifícios antigos têm um ciclo de vida cujo prolongamento terá maior sucesso se for apoiado em metodologias e tecnologias baseadas numa maior sustentabilidade económica e ambiental, do que no cumprimento da legislação corrente que acaba por se focar em exigências técnicas. A legislação corrente não considera os aspetos relativos à durabilidade dos edifícios para evitar a sua degradação precoce e

demolição, considerando que estas ações não são o resultado da má utilização dos moradores mas de quem é responsável pela sua construção e manutenção.

Além desta questão, Ornelas, Guedes e Vásquez (2012) citam ainda Krieger e Higgins (2002) que alertam para os códigos da habitação sustentando que estes são limitados pois baseiam-se em códigos nacionais uniformizados que estabelecem normas mínimas direcionadas para a construção de habitação nova, não alertando para as ações de manutenção ou de correção das más condições iminentes nos edifícios existentes.

Para além da legislação anteriormente referida foi publicado em Diário da República, no passado, o diploma RERU (Regime Especial de Reabilitação Urbana) – Dec. Lei 53/2014, aplicado “à reabilitação de edifícios ou de frações com pelo menos 30 anos, ou localizados em áreas de reabilitação urbana destinadas a habitação”.

1.1.2.3. Edifícios Recentes

O crescimento explosivo das áreas metropolitanas e dos seus subúrbios, para onde foram segregadas milhares de famílias de baixo estatuto socioeconómico, geraram áreas urbanas periféricas, simbólica e fisicamente desqualificadas, incapazes de se constituírem em si próprias como pedaços coerentes de cidade. Assim, a reabilitação urbana de conjuntos e bairros residenciais recentes depara-se, a nível urbanístico, com um leque de dificuldades e deficiências específicas, (Paiva, Aguiar e Pinho, 2006).

Existem problemas ao nível do edificado recente que influenciam de forma decisiva a imagem urbana, nomeadamente, a excessiva monotonia formal, a falta de atratividade, ou a falta de escala e caracterização humana. A reabilitação urbana de uma dada área não pode ser feita independentemente da reabilitação dos edifícios que a constituem. A reabilitação do edificado pode ser utilizada em benefício da melhoria da qualidade da imagem urbana, (Paiva, Aguiar e Pinho, 2006).

Constituição dos edifícios recentes

A envolvente dos edifícios recentes é caracterizada por frequentemente os edifícios se encontrarem separados uns dos outros e a inexistência de pátios estreitos e descobertos entre dois edifícios ou no interior dos edifícios, (Cóias, 2006).

O envelope é constituído por paredes rebocadas e pintadas ou revestidas de diversos materiais. Este tipo de edifícios não possui empenas ou empenas de dimensões pouco importantes. A sua cobertura é em telhado ou em terraço impermeabilizado. A caixilharia pode ser metálica ou de plástico, (Cóias, 2006).

Os interiores são compostos por divisória de tijolo leve e os revestimentos de estuque pintado, (Cóias, 2006).

A sua estrutura é composta por betão armado sobre fundações por sapatas isoladas e, por vezes estacas, de betão armado, (Cóias, 2006).

A estrutura dos edifícios recentes é constituída de betão armado. O betão resiste bem à compressão, mas tem uma fraca resistência à tração: o aço, sob a forma de varões colocados no interior da sua massa, anula esta insuficiência, permitindo ao elemento resistir a flexões. Por seu turno, o aço, exposto ao ar e à água, rapidamente se deteriora: o betão envolvente protege-o com a sua alcalinidade, permitindo ao elemento resistir à passagem do tempo, (Cóias, 2006).

A qualidade do produto final depende de grande número de intervenientes, com graus de responsabilidade e qualificação muito variáveis, sendo muito suscetível a uma falha humana. Os estaleiros de construção são fábricas volantes. Os componentes utilizados, quer o cimento, quer sobretudo, os agregados, apresentam grande variabilidade de características. As condições de doseamento, amassadura, transporte, colocação, compactação e cura variam constantemente, (Cóias, 2006).

O betão segrega, exsuda, disseca, retrai, fissura e flui sob carga, como se pode ver na Figura 1.4 e Figura 1.5. Os componentes do cimento hidratado reagem com o meio ambiente. O hidróxido de cálcio carbonata-se baixando o pH e deixando as armaduras à mercê da corrosão. Os agentes agressivos presentes no ar poluído ou na água de contacto penetram nos poros, canalículos e fissuras, atacam as armaduras ou reagem com o ligante e os inertes. Por vezes, estes reagem entre si, iniciando um lento processo de desintegração do betão, (Cóias, 2006).



Figura 1.4 - Estrutura de betão degradada, J. Sousa Coutinho



Figura 1.5 - Estrutura de betão degradada, J. Sousa Coutinho

1.1.3. REABILITAÇÃO DE REVESTIMENTOS

A aplicação de três ou mais camadas de reboco sobre uma camada de regularização da parede é observada em revestimentos exteriores desde a antiguidade. O primeiro estrato era em geral composto de cal e agregados com uma granulometria mais elevada ou, em alternativa, utilizando-se aditivos como o *cocciopesto* ou *pó de tijolo* (*Opus Signinum*), o que aumentava a hidraulicidade das argamassas. Sobre este primeiro estrato aplicavam-se em geral mais duas camadas de reboco de cal e areia (*Opus Arenatum*). Finalizado o reboco, executava-se frequentemente um acabamento com pó de mármore (*Marmoratum*) aplicando até três camadas finíssimas de um guarnecimento feito com pasta de cal e pó de mármore (*Opus Marmoratum*), variando essas camadas no tipo de granulometria, cada vez mais fina, dos agregados, (Veiga et al., 2004).

Nas construções mais correntes não se utilizavam tantas camadas de revestimento mas soluções mais simples, com menor número de estratos. Muitas vezes não se executavam os estratos mais lisos, feitos com pó de mármore, (Veiga et al., 2004).

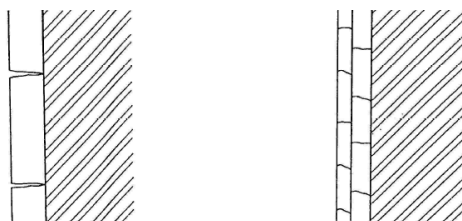


Figura 1.6 – Comparação entre a fissuração de um revestimento numa única camada e um reboco multicamada, (Veiga, 2006a)

O número de camadas e a sua espessura têm consequências diretas tanto na retração durante o processo de endurecimento das argamassas como na melhoria do comportamento dos rebocos em presença da água, já que, pela descontinuidade das camadas, se reforça a resistência à penetração da água em estado líquido quando ocorre a fissuração do revestimento como se pode ver na Figura 1.6, mantendo uma elevada permeabilidade ao vapor de água, (Veiga et al., 2004). Na Figura 1.7 é possível observar a diferença de comportamento entre um revestimento em multicamada no que se refere à deformação e transporte de água.

As argamassas antigas contam-nos a história tangível e intangível das gerações anteriores, garantindo a autenticidade histórica, material e arquitetónica da apresentação dos imóveis ancestrais, (Veiga et al., 2004).

As argamassas de revestimento devem proteger a parede da ação da água, da ação direta dos agentes climáticos, de ações mecânicas de choque e erosão, da ação química da poluição e dos sais solúveis contidos nos materiais, na água e no solo, (Veiga et al., 2004).

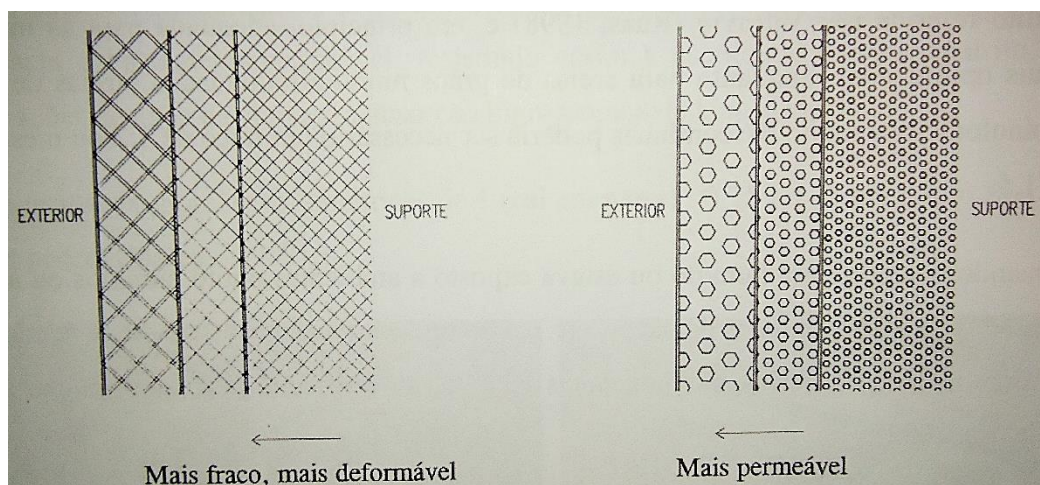


Figura 1.7 - Representação esquemática do funcionamento de um revestimento multicamada no que se refere à deformação e ao transporte de água, (Veiga, 2011)

Estando tão expostos, os revestimentos e as juntas são frequentemente os elementos cuja degradação ocorre mais depressa e é mais visível e que, em consequência, mais rapidamente necessitam intervenções de conservação e de restauro.

Os principais tipos de anomalias nos revestimentos exteriores dependem tanto de fatores intrínsecos aos materiais e técnicas utilizadas na sua fabricação como de processos naturais ou artificiais da sua alteração ao longo do tempo, nomeadamente fatores ambientais e de fatores humanos. Podem também existir interações entre os fatores de degradação dos revestimentos e as restantes partes da construção, gerando encadeamentos de fatores que podem acelerar fortemente os processos correntes de degradação, (Veiga et al., 2004).

1.1.3.1. Exigências para revestimentos a aplicar em edifícios antigos, (Veiga, 2006a)

Segundo a autora os revestimentos de substituição devem respeitar os seguintes requisitos:

- Não contribuir para degradar os elementos pré-existent, nomeadamente as alvenarias.
- Proteger as paredes
- Não prejudicar a apresentação visual da arquitetura, nem descaracterizar o edifício.
- Ser duráveis (e contribuir para a durabilidade do conjunto)

Uma argamassa inadequada pode provocar a degradação em vez de proteger os elementos com os quais está em contacto, Veiga (2006a):

- Por introdução de tensões excessivas num suporte eventualmente fraco e com deficiências de coesão, em geral originadas pela retração ou por variações dimensionais de origem térmica.
- Através da tendência para reter a água no suporte, em lugar de facilitar a sua secagem provocando a patologia associada à humidade
- Através da introdução, nas alvenarias e nas outras argamassas, de sais solúveis que não existiam antes, provenientes, por exemplo, do cimento.

Assim a argamassa a formular deve ter um módulo de elasticidade reduzido e uma boa capacidade de relaxação para não desenvolver tensões elevadas quando sofre variações dimensionais restringidas; deve dificultar a penetração da água até ao suporte, mas principalmente deve favorecer a evaporação da água que se introduz quer através da própria argamassa, quer através das fundações, por capilaridade ascendente, quer ainda através de coberturas e remates; não deve ter na sua constituição materiais ricos em sais solúveis, (Veiga, 2006a).

As argamassas de revestimento devem proteger a parede da ação da água, da poluição e dos sais solúveis contidos nos materiais, na água e no solo. Para poder desempenhar essas funções, o revestimento deve ter resistência mecânica suficiente, ser relativamente deformável, apresentar impermeabilidade suficiente e ter um bom comportamento aos sais, (Veiga, 2006a).

Essencialmente, as argamassas a usar em revestimentos de edifícios antigos, têm que ter alguma resistência mecânica mas um módulo de elasticidade reduzido; uma certa capacidade de impermeabilização mas, principalmente, uma permeabilidade ao vapor de água particularmente elevada e uma grande facilidade de secagem; não podem conter sais solúveis em quantidades significativas; para minimizar as tensões devidas a deformações diferenciais, devem ter características físicas semelhantes às da alvenaria, nomeadamente no que se refere a módulo de elasticidade e a coeficiente de dilatação térmica e higrométrica, (Veiga, 2006a).

É importante enfatizar que estas funções são garantidas pelo revestimento no seu conjunto e não por uma única camada de argamassa, executada em condições normalizadas, que é geralmente o objeto de ensaio. Assim, o número de camadas, a respetiva espessura, a composição relativa dessas camadas e a tecnologia de aplicação são aspetos tão importantes como o material utilizado, (Veiga, 2006a).

Estes requisitos devem ser assegurados pela solução de reboco, ou seja pelo conjunto das várias camadas que o constituem. Para os rebocos correntes executados em obra, são recomendadas pelo menos três camadas: chapisco ou camada de aderência, bastante fluida, rugosa, com elevada dosagem de ligante, destinada a homogeneizar a absorção do suporte e a estabelecer a ligação com a alvenaria; camada de base, destinada a promover a regularização e a impermeabilização; camada de acabamento, mais fina, de menor granulometria e mais fraca que as anteriores, vocacionada para proteção e para conferir um acabamento esteticamente aceitável, que será depois complementado por exemplo, por uma pintura.

As camadas devem obedecer à regra da degressividade do teor de ligante no sentido alvenaria-exterior, para que o revestimento seja mais poroso e mais deformável do interior para o exterior. Cada camada tem uma função principal diferente e deve ter uma dosagem específica, pois as várias funções implicam características diferentes e por vezes contraditórias da argamassa. Por outro lado, a existência de várias camadas, aplicadas com um período de secagem entre elas, promove, só por si, um melhor comportamento à fendilhação (as fendas que se formam são de menor abertura e, por serem desfasadas, dificultam a passagem da água) e um melhor comportamento à água, gerando barreiras adicionais à entrada da água líquida sem, contudo, prejudicar a evaporação, (Veiga, 2006a).

No entanto, atualmente, devido ao elevado custo da mão-de-obra e aos curtos prazos impostos à construção, usam-se cada vez mais produtos pré-doseados aplicáveis numa única camada (rebocos monocamada) ou em duas camadas seguidas de pintura (massas de reboco). Esses produtos contêm diversas adições e a sua formulação elaborada permite-lhes, em princípio, atingir com menos camadas níveis de desempenho que as misturas correntes apenas conseguem com três ou mais. Naturalmente, as exigências para estas argamassas pré-doseadas têm que ser superiores, para que o reboco, no seu conjunto, tenha desempenho semelhante ao reboco corrente, (Veiga, 2006a).

Outro requisito relacionado com a composição dos revestimentos é não prejudicar a apresentação visual da arquitetura, nem descaracterizar o edifício, contribuindo assim para a manutenção de uma imagem histórica e esteticamente compatível, nomeadamente em termos de textura e características cromáticas, mas também com a tecnologia de aplicação, Veiga (2006a).

A durabilidade é essencial para que os restantes requisitos adquiram significado. Com efeito, embora no limite os revestimentos sejam camadas de sacrifício, já que é mais importante a preservação das alvenarias antigas, é importante realçar que a degradação do revestimento leva, em geral, à degradação rápida da alvenaria. A durabilidade implica boa resistência mecânica, nomeadamente aos choques, boa coesão interna, boa aderência ao suporte e entre camadas – mas não excessiva para não impedir a reversibilidade – e boa resistência química, designadamente aos sais existentes nas paredes antigas. Implica também um bom comportamento à água: absorção relativamente lenta e, de novo, facilidade de secagem. A durabilidade exige ainda alguma resistência à colonização biológica e com o comportamento à água, já que períodos longos de humedecimento aumentam a probabilidade de fixação de fungos. O objetivo de um revestimento é a proteção da parede, assim a capacidade de proteção e de não degradação deve ser privilegiada em relação à durabilidade do novo revestimento, (Veiga, 2006a).

1.2. ARGAMASSAS

1.2.1. CONCEITO DE ARGAMASSA

A argamassa é um material que, no estado fresco, tem consistência plástica e é composto pela mistura de areia, ligante, água e, eventualmente, adjuvantes. A combinação da água com o ligante promove a hidratação e endurecimento deste e, ao mesmo tempo a aglutinação da areia, fenómeno que origina a aderência ao suporte em que é aplicada a argamassa e a sua resistência. As areias dão corpo ao material, concorrem também para a sua compacidade e resistência e ainda para reduzir a retração da mistura, (Lauria et al., 2006).

A água é um elemento fundamental no fabrico das argamassas, pois ao reagir com o ligante, promove a sua hidratação, reação imprescindível para ativar as suas características aglutinantes e de aderência. A água de amassadura, devido à trabalhabilidade e maneabilidade, é sempre superior à que é necessária para hidratar o ligante e molhar a areia de modo a que se estabeleça uma adesão perfeita entre esta e o ligante. No entanto, o excesso de água influencia negativamente o comportamento da argamassa, pois reduz a resistência e a compacidade, aumenta a permeabilidade e pode promover a fissuração, (Lauria et al., 2006).

O ligante hidráulico ao hidratar-se transforma-se numa espécie de “cola” que aglomera os diversos constituintes da argamassa e promove a sua ligação aos suportes em que é aplicada. Uma vez que no fabrico das argamassas não é possível obter misturas de compacidade absoluta, nas pastas ficará sempre algum ar retido, pelo que é também um dos constituintes, (Lauria et al., 2006).

Quando se pretende conferir determinadas propriedades especiais às argamassas, podem introduzir-se nas composições pequenas quantidades de adjuvantes, (Lauria et al., 2006).

1.2.2. CARACTERÍSTICAS DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO

As argamassas de revestimento utilizadas em reabilitação têm de ter como característica fundamental a compatibilidade com o suporte em que são aplicadas, de modo a poderem garantir a referida proteção. Assim sendo, as argamassas mais utilizadas em paredes mais antigas, tendo em consideração a referida

compatibilidade, são as que utilizam como ligante a cal aérea ou a cal hidráulica, em função das características do suporte e das exigências funcionais requeridas, (Faria et al., 2014).

A capacidade de absorção de água das argamassas possui uma grande influência na sua durabilidade, uma vez que esta característica determina a facilidade de penetração de agentes agressivos no interior das mesmas.

A durabilidade de uma argamassa aos ciclos gelo-degelo encontra-se relacionada com a sua capacidade para absorver a água, a velocidade com que a absorção de água é realizada e também com o facto de a argamassa possuir uma estrutura porosa e que seja capaz de resistir à tensão provocada pelo aumento de volume da água quando passa ao estado sólido, (Cunha et al., 2014). A sua resistência aos ciclos gelo-degelo depende também da sua capacidade para perder a água rapidamente prevenindo a saturação, (Santos, Frade e Pereira, 2014).

A estrutura porosa determina as principais características das argamassas tais como, as resistências mecânicas, a permeabilidade ao vapor, a resistência aos ciclos de gelo-degelo, entre outras, (Santos, Frade e Pereira, 2014).

1.2.2.1. Argamassas tradicionais

As argamassas tradicionais são constituídas por um ou mais ligantes minerais (cimento, cal hidráulica ou cal aérea) e areia, podendo ser adjuvados com plastificantes, retentores de água, entre outros. Estas argamassas são doseadas e preparadas em obra, como esquematizado na Figura 1.8 e Figura 1.9, utilizando, em geral, areia da própria região onde se situa a obra.



Figura 1.8 - Preparação manual de argamassa, (Mascarenhas, 2004)



Figura 1.9 - Preparação de argamassa com betoneiras mecânicas, (Mascarenhas, 2004)

Argamassa à base de cal aérea

Vantagens

A utilização da cal aérea como ligante em argamassas trás algumas vantagens, sendo de destacar, (Mascarenhas, 2006):

- Retarda o tempo de presa permitindo aos revestimentos serem trabalhados e conferindo melhores acabamentos
- É permeável ao vapor de água
- Dificulta a formação de condensações e eflorescências

Inconvenientes

No entanto, este ligante tem alguns inconvenientes durante o endurecimento e também na sua aplicação, sendo de realçar, (Mascarenhas, 2006):

- As retrações durante a secagem podem fazer o revestimento soltar-se;
- As retrações podem provocar fissuras que, apesar de facilitarem a fixação do CO₂ (processo de carbonatação), pode provocar infiltrações;
- Os revestimentos exteriores com cal aérea são mais porosos, mais permeáveis à água e logo menos duráveis;
- Uma vez que as argamassa à base deste ligante ganham presa muito lentamente, e ao ar, devem ser aplicadas durante o tempo seco.

Argamassa à base de cal hidráulica

Vantagens

As argamassas para revestimentos à base de cal hidráulica são aquelas que apresentam mais vantagens, nomeadamente, (Mascarenhas, 2006):

- Tem uma aderência melhor do que a cal, mas não uma rigidez que impeça de acompanhar alterações do suporte ou da estrutura;
- O calor de hidratação é baixo e liberta-se lentamente fazendo que a evaporação da água seja lenta evitando assim o aparecimento de fissuras;
- As eventuais retrações que se registam são moderadas;

- Os revestimentos com cal hidráulica são permeáveis ao vapor de água restituindo a água proveniente nas paredes sob a forma de vapor de água nos dias mais quentes;
- A perda de água durante a presa é lenta mesmo em suportes muito absorventes.
- Comparativamente ao cimento, cal hidráulica tem vantagens sobre as argamassas à base de cimento devido à sua menor retração, (Coelho, 2009).

Argamassa à base de cimento portland

Vantagens

O revestimento com cimento na sua constituição tem algumas vantagens, destacando-se as seguintes, (Mascarenhas, 2006):

- Imune à água após ganhar presa
- Boa resistência mecânica no salpico, para além de impermeabilizar confere uma forte coerência à superfície do pano onde é aplicado. Nas camadas de regularização e suporte de revestimentos de pedra confere uma boa coesão;
- Confere boa aderência que pode ser melhorada com a utilização de areia grossa;
- Confere boa resistência ao choque e à abrasão do revestimento.

Inconvenientes

No entanto, este tipo de argamassas de revestimento têm alguns inconvenientes, nomeadamente, (Mascarenhas, 2006):

- Ao secar a libertação da água à superfície é mais rápida que em profundidade podendo provocar o aparecimento de microfissuras, que em algumas situações podem assumir toda a espessura do revestimento;
- O cimento pode conferir uma rigidez excessiva ao revestimento impedindo-o de acompanhar qualquer alteração do suporte ou da estrutura;
- Pode não tolerar a expansão térmica ou higrométrica de materiais de revestimento com pequenas espessuras como tijolo à vista ou azulejos;
- Não é permeável ao vapor de água;
- Impede a saída de humidades da chuva que tenham penetrado na parede ou que tenha sido absorvida do solo.

1.2.2.2. Argamassas industriais

Considerações Gerais

As primeiras argamassas fabris em Portugal foram produzidas durante os anos 70/80 do século XX, resumindo-se ao fabrico de Colas de Construção, vulgarmente conhecidas por cimentos-cola.

Além da atividade fabril relativa ao cimento-cola, e ainda durante os anos 80, uma empresa nacional registou uma marca de revestimento hidráulico e fez algumas experiências de aplicação em obra com reboco ensacado. O desenvolvimento das argamassas fabris veio a assumir importância durante os anos 90, com especial importância para os revestimentos, as monomassas, os cimentos-cola e as juntas em cor. Aliás, foi durante esta década que a preparação de cimento-cola em obra praticamente desapareceu, (APFAC, 2007).

No início do século XXI já existia em Portugal um conjunto razoável de empresas nacionais e multinacionais, modernas e bem equipadas, que sentiram a necessidade da criação de uma Associação.

Em consequência, no ano de 2002, pela iniciativa de cinco empresas, criou-se a Associação Portuguesa de Fabricantes de Argamassas de Construção que rapidamente duplicou o número de associados, tendo iniciado um conjunto importante de atividades de divulgação das argamassas fabris, (APFAC, 2007).

Este tipo de argamassas podem ser à base de cal hidráulica ou cal aérea ou cimento, tal como as argamassas tradicionais, com as mesmas vantagens e inconvenientes referidos. As argamassas industriais diferem das tradicionais no modo de produção, que em obra apenas é necessário adicionar-lhes água.

Definição

A NP EN 998-1 define como argamassa industrial para revestimentos uma argamassa doseada e misturada em fábrica. Esta pode ser fornecida como argamassa “seca” com mistura pronta que necessite apenas da adição de água, ou argamassa em pasta que é fornecida pronta a usar.

Produção de argamassas industriais em pó

A produção de argamassas industriais é realizada através da junção de agregados, ligantes e aditivos. Antes de serem misturados, os agregados e os ligantes são submetidos a um processo de secagem para não existir o risco de as argamassas sofrerem hidratação durante a sua produção, ensacagem e transporte até à obra.

Na fábrica de produção de argamassas existe um vagão que é alimentado com areias e ligantes que encaminha a pedra calcária e as areias a um silo que leva as areias e a pedra calcária a um secador. Após o processo de secagem a pedra calcária é transportada para um britador, sobe até à torre da unidade de produção e aí sofre um processo de crivagem para obter o produto com várias granulometrias diferentes. O agregado de sílica fina é colocada num silo distinto.

Este sistema automatizado fornece indicações sobre o estado dos silos, se se encontram cheios ou vazios e a sua percentagem de enchimento.

Após o material se encontrar nos silos, há o doseamento de cada componente através de pesagem nas balanças. Depois de doseado, o material é misturado a seco para que haja uma melhor homogeneização dos seus componentes. Posteriormente este é encaminhado para silos onde se faz a ensacagem de forma automática. Este processo encontra-se esquematizado na Figura 1.10.

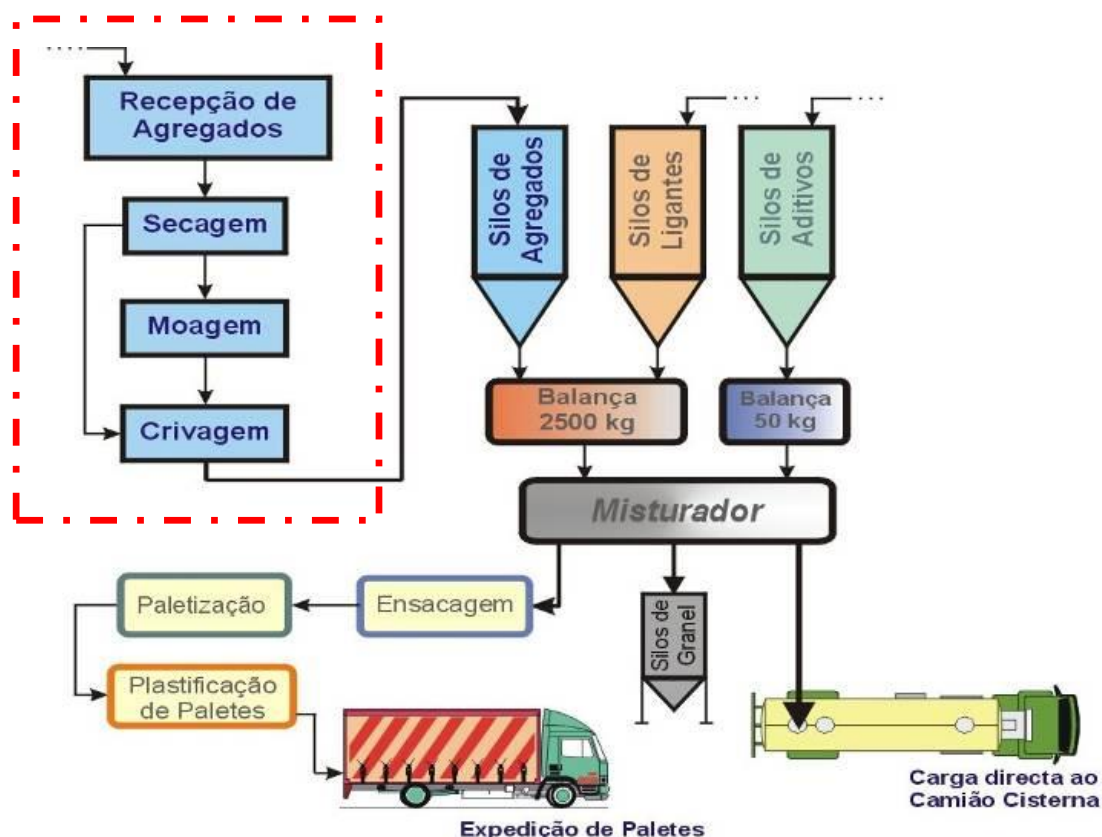


Figura 1.10 - Doseamento das argamassas secas, (APFAC, 2007)

1.2.3. MATÉRIAS-PRIMAS DAS ARGAMASSAS

1.2.3.1. Agregados

Os agregados são materiais granulares que não intervêm na reação de endurecimento da argamassa. Estes podem ser classificados em grossos e finos, consoante sejam ou não retidos no peneiro de malha 4 mm segundo a NP EN 12620. Em argamassas de revestimento utiliza-se os agregados finos.

Os agregados finos com grãos de maiores dimensões conferem maiores resistências do que os de grão de menor dimensão, no entanto exigem maior teor de ligante para o preenchimento de vazios entre grãos. As areias de grãos finos, uma vez que exigem maiores quantidades de água para ficarem plásticas e trabalháveis, tornando-se muito porosas e menos resistentes, (Branco, 1981).

Deste modo, as condições ideais para a produção de uma boa argamassa resulta da combinação equilibrada entre grãos finos e grossos, ou seja, uma composição granulométrica plena, resultando daí argamassas mais compactas, com menor quantidade de aglomerante e de água e com plasticidade e aderência satisfatórias, (Gonçalves e Margarido, 2012).

1.2.3.2. Ligantes

O ligante é um material cuja propriedade essencial é fazer presa e endurecer quando amassado com água, podendo aglomerar outros materiais, (Júnior, 1963).

Os ligantes podem ser subdivididos em dois tipos, ligantes hidrófilos e hidrófobos. Dentro ainda dos ligantes hidrófilos estes podem dividir-se em aéreos e hidráulicos, (Coutinho, 2014).

Os ligantes hidrófilos têm afinidade com água e quando misturados com ela formam uma pasta que endurece. Este tipo de ligante é constituído por um material sólido finamente pulverizado. No que diz respeito aos ligantes hidrófilos hidráulicos, como o cimento e a cal hidráulica, quando misturados com água formam uma pasta que endurece ao ar ou dentro de água. Após o endurecimento da pasta, o material obtido é resistente à água. Quanto aos ligantes hidrófilos aéreos, como é o caso da cal aérea, quando misturado com água, formam uma pasta que endurece ao ar. Esta pasta, depois de endurecer, não é resistente à água. (Coutinho, 2014).

Os ligantes hidrófobos são constituídos por substâncias mais ou menos viscosas que endurecem por arrefecimento, por evaporação dos seus dissolventes ou por reação química entre diferentes componentes. Estes ligantes não têm qualquer relação com a água durante a sua produção e endurecimento. Após o endurecimento estes ligantes repelem a água. Contrariamente aos ligantes hidrófilos, apresentam-se sob a forma de líquidos viscosos ou soluções resinosas, (Coutinho, 2014).

As cais e os cimentos têm uma propriedade em comum: misturados com águas, em proporção conveniente, formam uma pasta plástica que solidifica ao fim de certo tempo, o que se denomina de presa, endurecendo depois lentamente. O tempo de presa é contado desde que a pasta começa a perder a sua plasticidade, até que a perde por completo, (Júnior, 1963).

Cal aérea

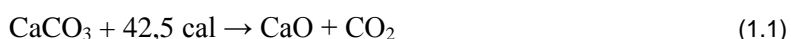
O ligante resultante da cozedura dos calcários mais abundantes na natureza, constituídos essencialmente por CaCO_3 , é um dos ligantes artificiais mais antigos.

Segundo a NP EN 459-1, a cal aérea, quando é doseada e misturada com água adequadamente forma uma pasta que melhora a trabalhabilidade e a retenção da água das argamassas. A carbonatação dos hidratos em contacto com o dióxido de carbono atmosférico forma carbonato de cálcio que desenvolve resistência e contribui para a durabilidade das argamassas.

A cal aérea resulta da decomposição, por ação da temperatura, de calcário com teor não inferior a 95% de carbonato de cálcio ou de carbonato de cálcio e magnésio. Consoante as percentagens, a cal aérea pode ser classificada como cálcica (podendo ser gorda quando se obtém a partir de calcários com percentagem não inferior a 99% de carbonatos, ou magra quando os calcários de que provem contêm de 1% a 5% de argila ou de outras impurezas) ou ainda como magnesiana (quando o teor em óxido de magnésio de matéria prima é superior a 20%).

A cal aérea é constituída principalmente por óxido ou hidróxido de cálcio a qual endurece lentamente ao ar por reação com o dióxido de carbono atmosférico. Esta cal não ganha presa dentro de água, visto não ter propriedades hidráulicas. Apresenta-se na forma de cal viva ou de cal hidratada, (Coutinho, 2014).

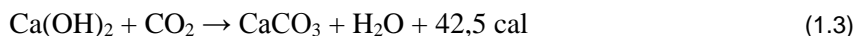
As fases de produção, hidratação e carbonatação da cal aérea podem ser descritas quimicamente através de um conjunto de reações químicas, cujas equações se apresentam, respetivamente, por:



Por cozedura dos calcários a cerca de 900 °C dá-se a reação de calcinação da cal, que é endotérmica, com a formação de óxido de cálcio ou cal viva.



Provocando a reação de extinção da cal viva, que é exotérmica expansiva, por aspersão com água ou por imersão em água, obtém-se cal apagada em pó ou em pasta.



O endurecimento da cal apagada aplicada em obra dá-se por carbonatação, fixação do dióxido de carbono da atmosfera ao hidróxido de cálcio com nova formação de carbonato de cálcio, com libertação de água. Por ser uma reação exotérmica, com dilatação associada à libertação de calor, na secagem surgem fendas de retração devido ao material não ter suficiente ductilidade para acompanhar a alteração de volume, (Laboratório Nacional de Engenharia, 1996).

O endurecimento da cal aérea divide-se em duas fases. Em primeiro lugar dá-se a evaporação da humidade em excesso e em segundo dá-se a recarbonatação por uma reação química muito lenta, ao ar (daí o nome aérea), em que o hidróxido se reconverte em carbonato de cálcio por recombinação com o dióxido de carbono, CO_2 , (Coutinho, 2014).

É de notar que o hidróxido de cálcio é solúvel na água e mais ainda na água salgada. Deste modo, não pode ser usado em obras hidráulicas nem marítimas uma vez que não ganha presa nem endurece em água e é ainda mais solúvel em água salgada, (Coutinho, 2014).

Cal hidráulica

A cal hidráulica resulta da calcinação de rochas calcárias que contêm mais de 5% de argila. Este tipo de cal pode endurecer e consolidar-se em ambiente húmido e debaixo de água, (Branco, 1981).

Quando o calcário que se sujeita à ação da temperatura tem quantidades de argila compreendidas entre 5% e 20%, além da formação do óxido de cálcio, há combinação da sílica e da alumina com este, em quantidades não desprezíveis, resultando daí a presença de silicatos e aluminatos que, hidratando-se, dão origem a produtos que endurecem tanto na água como no ar, são as cals hidráulicas. (Coutinho, 1997).

Vicat reconheceu que a hidraulicidade da cal dependia da maior ou menor proporção de argila no calcário. Notou que, além de 20% de argila, o produto obtido por cozedura já não se extinguia por adição de água; a este produto chamou de cal limite, pois marca a transição para os cimentos naturais, (Coutinho, 1997).

A cal hidráulica é muito utilizada na Reabilitação do Património. A percentagem de cal livre confere uma baixa fissuração dos rebocos e a elevada finura contribui para uma adequada trabalhabilidade e bom acabamento.

Cimento Portland

De acordo com a NP EN 197-1 o cimento CEM é um ligante hidráulico que quando misturado com água forma uma pasta que ganha presa e endurece por reações e processos de hidratação e que conserva a sua resistência mecânica, depois do endurecimento, e estabilidade mesmo debaixo de água. O endurecimento dos cimentos CEM é, essencialmente, devido à hidratação de silicatos de cálcio. A soma, em massa, da quantidade de óxido de cálcio e sílica reativos é pelo menos 50%, (Coutinho, 2014).

O cimento Portland é obtido a partir de uma mistura devidamente proporcionada de calcário, argila e, eventualmente, outra ou outras substâncias apropriadas ricas em sílica, alumina ou ferro, reduzida a pó muito fino que se sujeita à ação de temperaturas da ordem de 1450 °C, obtidas geralmente em grandes fornos rotativos, (Coutinho, 2014). A evolução da resistência à compressão do cimento portland ao longo dos anos encontra-se na Figura 1.11.

Àquelas temperaturas as matérias-primas reagem entre si, no que são ajudadas pela fase líquida obtida pela fusão de cerca de 20% da matéria-prima, originando novos compostos. Em virtude destes fenómenos químicos e físicos, os produtos da reação, ao arrefecerem, aglomeram-se em pedaços com dimensões variáveis mas geralmente entre 2 mm e 20 mm, chamados clinquer, (Coutinho, 1997).

A partir das margas calcárias, com teor de argila entre 20% e 40%, obtinham-se antigamente os cimentos naturais, (Laboratório Nacional de Engenharia, 1996).

Quando há a junção de água ao cimento ocorre uma reação química. Os silicatos de cálcio e os aluminatos de cálcio transformam-se em hidratos de cimento com a formação de cristais. É esse precipitado de micro-cristais que provoca o fenómeno de presa (com o aumento da temperatura interna). Segue-se uma fase de endurecimento que é a continuação do ciclo de formação dos cristais, (Matana, 1991).

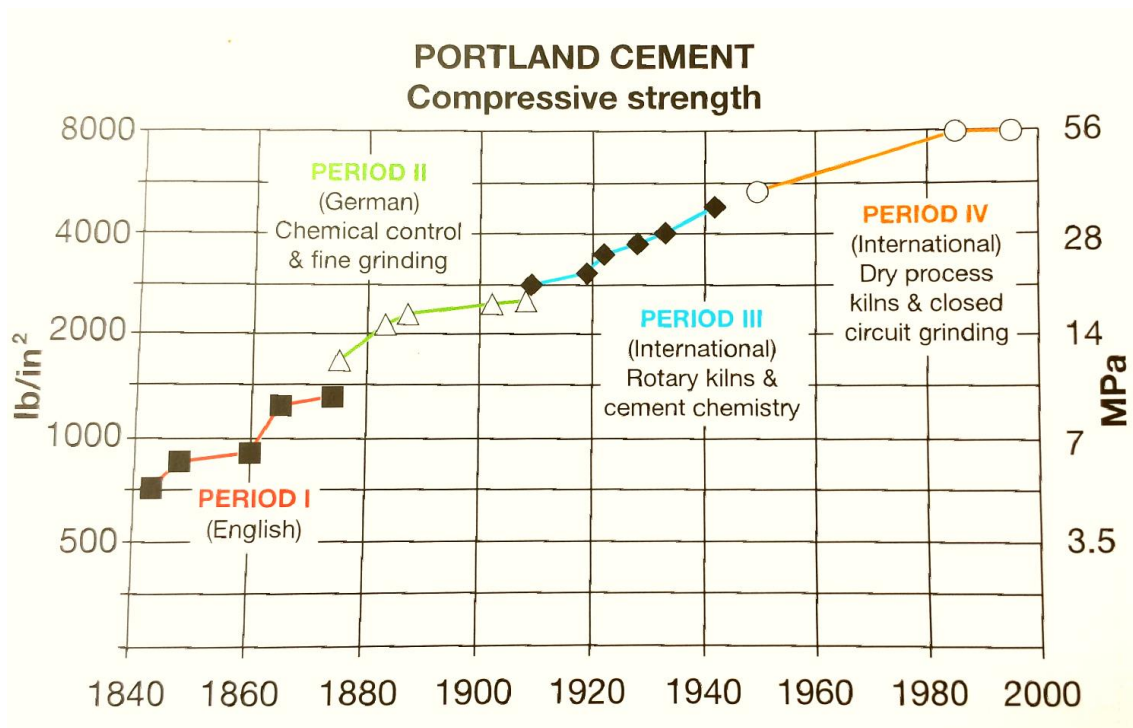


Figura 1.11 - Evolução da resistência à compressão do cimento portland ao longo dos anos, (Secil, 2014)

1.2.3.3. Água de amassadura

A água a utilizar em argamassas deve ser potável e não conter sais nocivos à presa dos ligantes e ao comportamento destes em obra, (Branco, 1981).

O doseamento da água depende da finura dos grãos do ligante e da granulometria dos agregados e deve ser sempre feito utilizando o mínimo de água, dentro das possibilidades de se obter uma mistura suficientemente plástica, isto para se reduzirem ao mínimo os vazios que a água deixa ao evaporar.

Contudo, o mínimo de água a adicionar varia consoante a humidade das areias, a temperatura ambiente e o estado das superfícies a ligar ou revestir, (Branco, 1981).

1.2.4. LEGISLAÇÃO PARA AS ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO

As argamassas de revestimento à base de ligantes minerais são objeto da norma europeia EN 998-1:2013, que indica quais os requisitos regulamentares necessários para a marcação CE e das normas EN 13914 que recomendam aspetos ligados à conceção, preparação e aplicação de argamassas de revestimento exterior e interior, (Gonçalves e Margarido, 2012).

O mesmo autor refere que estas normas possuem um carácter generalista nas especificações e recomendações. Deste modo, continuam a ser utilizados pelos países da União Europeia documentos complementares nacionais. Apesar de estes documentos terem perdido carácter normativo, fornecem muitas indicações relevantes para o tipo de revestimento em interesse.

Em Portugal, os documentos com as características complementares são emitidos pelo LNEC ou pelos organismos de certificação de produtos, quando o objetivo é a marca de produto certificado. Os Documentos de Aplicação de revestimentos pré-doseados de ligante mineral com base em cimento destinam-se a comprovar a adequabilidade ao uso deste tipo de revestimento e incluem os critérios e as exigências estabelecidos no âmbito da marcação CE pela EN 998-1 e, por outro lado, os requisitos adicionais que o LNEC considera relevantes para o bom comportamento global dos revestimentos exteriores, (Gonçalves e Margarido, 2012).

1.3. A CAL HIDRÁULICA NA REABILITAÇÃO DE REVESTIMENTOS

As argamassas de cimento, como argamassas de reabilitação, têm a seu favor o atual uso comum e a rapidez com que adquirem elevadas resistências mecânicas, bem como o baixo coeficiente de absorção capilar. No entanto, essas resistências mecânicas são geralmente demasiado elevadas para os suportes de edifícios antigos, possuem baixa deformabilidade e baixa permeabilidade ao vapor de água. Acrescentando ainda a estas desvantagens, é de realçar a libertação de sais solúveis que lhes conferem pouca durabilidade e com custos danosos para os suportes, (Faria et al., 2012).

A produção de cimento apresenta ainda elevados consumos energéticos e de recursos naturais (água, margas calcárias, transportes) inerentes à produção, incluindo a moagem do clínquer, (Faria et al., 2012).

As argamassas de cal aérea têm vantagens ao nível dos custos de produção do ligante uma vez que não requerem temperaturas tão elevadas para a cozedura da matéria-prima. Este ligante é produzido a partir de calcários, praticamente sem necessidade de ser moído. As argamassas de cal aérea consomem dióxido de carbono para endurecer, são bastante permeáveis ao vapor de água, facilitando a evaporação da água, são mais deformáveis e apresentam resistências mecânicas que não produzem tensões prejudiciais nos suportes onde são aplicadas. No entanto, demoram muito tempo a atingir as características mecânicas necessárias e mesmo a endurecer, quando aplicadas em ambientes com muito elevada humidade relativa ou fraco contacto com o dióxido de carbono.

Em contrapartida, as argamassas de cal hidráulica natural, onde este ligante é produzido a partir de calcários com alguma percentagem de argilas, cozidas a temperaturas inferiores às do cimento, mas com necessidade de moagem. Nem todos os países possuem matéria-prima adequada à produção de cal hidráulica natural mas em Portugal existe capacidade de produção significativa, argamassas com base em cal na reabilitação de edifícios, (Faria et al., 2012).

As argamassas com base em cal aérea são reconhecidas como compatíveis e adequadas para a conservação e reabilitação de alvenarias antigas. Comparando as características mecânicas dos revestimentos de argamassas com cal hidráulica natural com as dos revestimentos de argamassas com base em cal aérea, aparentam ser adequadas para este tipo de aplicações. Ressalta também como muito positivo o potencial do seu comportamento face à água da chuva, (Faria et al., 2014).

A cal hidráulica natural apresenta vantagens face à cal aérea e ao cimento portland pois, contrariamente à cal aérea não possui só presa aérea mas também hidráulica permitindo uma cura mais consistente numa idade mais jovem, contribuindo para a facilidade de aplicação, e ainda desenvolve resistências mecânicas superiores. Comparativamente ao cimento portland tem um comportamento mais dútil, possui melhor relação flexão vs compressão, acompanhando os movimentos das estruturas mais facilmente, (Santos, Frade e Pereira, 2014).

A cal hidráulica contém, em pequena proporção, óxidos de cálcio e, deste modo, a resistência desenvolve-se de forma mais lenta e atingindo níveis muito mais baixos que o cimento. Devido a esta baixa taxa de desenvolvimento da resistência, as tensões iniciais exercidas pela humidade e/ou o movimento técnico são mais facilmente acomodadas pelo material, (Beningfield, 2009)

As argamassas à base de cal hidráulica são materiais muito porosos, de modo a que as condensações que ocorrem no seu interior e a precipitação de sais solúveis será menos problemático. Além disto, uma vez que têm maior fluência, as tensões resultantes de movimentos diferenciais a médio e longo prazo são melhor acomodadas, (Beningfield, 2009).

Há claramente uma série de benefícios na utilização destas argamassas, no entanto o desenvolvimento mais lento da resistência pode ser problemático, em climas frios pelo que historicamente este tipo de argamassas não eram aplicadas em períodos de inverno, (Beningfield, 2009).

Os resultados obtidos por Grilo et al. (2014) no estudo de diferentes condições de cura mostraram que em condições de cura marítimas, um ambiente naturalmente agressivo muito comum em Portugal e noutros países com costa marítima, a cal hidráulica natural é adequada para aplicar em argamassas de revestimento e de assentamento em ambientes com essas condições agressivas.

1.4. OBJETIVOS E ORGANIZAÇÃO DO PLANO DE TRABALHOS

O presente trabalho encontra-se dividido em seis capítulos.

No Capítulo 1, designado por Introdução, faz-se o enquadramento do tema do trabalho mostrando a importância da cal hidráulica natural na reabilitação de revestimentos de edifícios antigos.

No Capítulo 2, designado por Estado da Arte da Cal Hidráulica Natural, abordam-se as propriedades importantes da cal hidráulica, estudos efetuados sobre as diferentes propriedades das argamassas à base de cal hidráulica, apresentando-se deste modo as bases de conhecimento com que se deu início à realização deste trabalho.

No Capítulo 3, designado por Programa Experimental, são caracterizadas as argamassas em estudo, os ensaios realizados e respetivos resultados obtidos.

No Capítulo 4, designado por Novos Desenvolvimentos, é descrita a investigação de procedimentos para a avaliação da durabilidade de argamassas à base de cal hidráulica natural, através da adaptação de ensaios de durabilidade de outros materiais, nomeadamente o betão.

No Capítulo 5, designado por Análise e Discussão de resultados, procedeu-se à comparação dos resultados obtidos entre as argamassas em estudo nos diferentes ensaios e o cumprimento da normalização em vigor e recomendações de diferentes autores.

No Capítulo 6, designado por Conclusões e Desenvolvimentos Futuros, são referidas as conclusões obtidas através da análise dos resultados e as conclusões obtidas na aplicabilidade dos ensaios de durabilidade do betão em argamassas à base de cal hidráulica natural.

1.5. BIBLIOGRAFIA

Apfac (2007). Argamassas Fabris: Produção, Famílias, Normas. In Auditório COPRAI, Lisboa: 2007. Associação Industrial Portuguesa.

Beningfield, N. (2009). *Mortars*. Institution of Civil, Engineers.

Branco, J. P. (1981). *Manual do Pedreiro*. Lisboa: LNEC.

Coelho, A. (2009). *A Cal na Construção*.

Cóias, V. (2006). *Inspecções e ensaios na reabilitação de edifícios*. Lisboa: IST Press. ISBN 972-8469-53-5.

Leiria: Reabilitação dá nova vida a edifícios devolutos junto ao Rio Lis (<http://www.diarioleiria.pt/noticias/leiria-reabilitacao-da-nova-vida-edificios-devolutos-junto-ao-rio-lis>). 24/06/2015.

Coutinho, A. S. (1997). *Fabrico e propriedades do betão*. Lisboa: LNEC. ISBN 972-49-0326-5.

Coutinho, J. S. (2014). *Materiais de construção 2*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Cunha, S., Aguiar, J., Ferreira, V., Tadeu, A. (2014). Caracterização mecânica e durabilidade de argamassas térmicas. *I Simpósio de Argamassas e Soluções Térmicas de Revestimento*,

Faria, P., Branco, T., Carneiro, J., Veiga, R., Silva, A. (2012). Argamassas com base em cal para a reabilitação de rebocos. In *4º Congreso de patología y rehabilitación de edificios. PATORREB 2012*. Santiago de Compostela: 2012. p. 6.

Faria, P., Costa, J., Lourenço, T., Figueiredo, T., Silva, V.; (2014). Caracterização de rebocos de argamassas de cal aérea e de cal hidráulica natural com metacaulino e resíduos cerâmicos em exposição natural. In *Argamassas 2014 - I Simpósio de Argamassas e Soluções Térmicas de Revestimento*. Universidade de Coimbra: 2014.

Freitas, V. P. (2012). *Manual de apoio ao projecto de reabilitação de edifícios antigos*. Porto: Ordem dos Engenheiros da Região Norte. ISBN 978-972-99918-7-5.

Gonçalves, M., Margarido, F. (2012). *Ciência e engenharia de materiais de construção*. Lisboa: IST Press. ISBN 978-989-8481-17-7.

Grilo, J., Faria, P., Veiga, R., Santos Silva, A., Silva, V., Velosa, A. (2014). New natural hydraulic lime mortars – Physical and microstructural properties in different curing conditions. *Construction and Building Materials*, 54:0. 378-384. ISSN 0950-0618.

Júnior, J. (1963). *Construção civil materiais e elementos de construção, instalações, máquinas*. Lisboa: Simposium Terapêutico.

Laboratório Nacional De Engenharia Civil (1996). *Curso de especialização sobre revestimentos de paredes*. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil. ISBN 972-49-1674-X.

Lauria, A.,Pinto, A.,Cruz, H.,Pinto, J.,Bastos, J.,Braga, M.,Farinha, M.,Moura, R.,Nogueira, R. (2006). *Reabilitação e manutenção de edifícios*. Lisboa:

Imóveis de interesse municipal

(<http://www.lisboapatrimoniocultural.pt/imoveis/imoveis/Paginas/Palacete-do-ChafarizD-ElRei-ou-Palacete-das-Ratas.aspx>). 24/06/2015.

A gaiola como génese da construção anti-sísmica (http://www-ext.lnec.pt/LNEC/DE/NESDE/divulgacao/gaiol_const_sism.html). 24/06/2015.

Mascarenhas, J. (2006). *Sistemas de construção descrição ilustrada e detalhada de processos construtivos utilizados correntemente em Portugal*. Lisboa: Livros Horizonte. ISBN 972-24-1339-2 (vol. 1).

Matana, M. (1991). *Alvenaria 1*. Mem Martins: Edições CETOP. ISBN 972-641-153-X.

NP EN 197-2: 2014. *Cimento Parte 2: Avaliação da conformidade*. Caparica: IPQ.

NP EN 459-1:2011. *Cal de construção Parte 1: Definições, especificações e critérios de conformidade*. Caparica, Portugal.: IPQ. 50 p-50 p p.

NP EN 998-1:2013. *Especificação de argamassas para alvernarias Parte 1: Argamassas para rebocos interiores e exteriores*. Portugal: IPQ. 23 p-23 p p.

NP EN 12620:2010. *Agregados para betão*. Caparica: IPQ. 61 p-61 p p.

Ornelas, C.,Guedes, J. ,Vásquez, I. (2012). *Reabilitação do Património Edificado a intervenção mínima como modelo*.

Paiva, J. V.,Aguiar, J.,Pinho, A. (2006). *Guia técnico de reabilitação habitacional*. Lisboa: Instituto Nacional de Habitação. ISBN 972-49-2081-X.

Roders, A.,Post, J.,Erkelens, P. (2006). *Uma Reabilitação Consciente*. PATORREB. FEUP.

Santos, A.,Frade, D.,Pereira, R. (2014). Comportamento de argamassas à base de cal hidráulica natural ao gelo-degelo. In 2014.

Secil Argamassas (2014). *A cal hidráulica natural, o ligante de eleição na reabilitação*.

Veiga, M. (2006a). *Comportamento de rebocos para edifícios antigos: exigências gerais e requisitos específicos para edifícios antigos*. Lisboa: LNEC. ISBN 972-49-2063-1.

Veiga, M. (2006b). *Intervenções em Revestimentos Antigos: Conservar, Substituir ou... Destruir*. PATORREB.

Veiga, M. (2011). *Conservação e reparação de revestimentos de paredes de edifícios antigos*. 2ª.

Veiga, M.,Aguiar, J.,Silva, A.,Carvalho, F. (2004). *Conservação e renovação de revestimentos de paredes de edifícios antigos*. Lisboa: LNEC. ISBN 972-49-2009-7.

2

ESTADO DA ARTE DA CAL HIDRÁULICA NATURAL

2.1. ENQUADRAMENTO HISTÓRICO

Julga-se que o homem terá descoberto a cal no início da Idade da Pedra, no Período Paleolítico, (Coelho, 2009) cita Narciso Gonçalves da Silva em “Argamassa de revestimento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária” publicada em 2006. Existem indícios da utilização da cal em algumas zonas da atual Turquia que remontam a um período entre 12000 a 5000 A.C., Coelho (2009) cita Michael Miller em “Lime” publicado em 1999 e J. Elsen em “Microscopy of historic mortars—a review” publicado em (2006).

Devido à erupção do vulcão Thera, em 1500 A.C., surgiram grandes quantidades de cinzas. Este material foi utilizado pela civilização grega na produção de argamassas que mais tarde evidenciaram propriedades hidráulicas, (Coelho, 2009).

A utilização de argamassas à base de cal disseminou-se a partir do fim do Império Romano e durante a Idade Média. Contudo, produziram-se argamassas com menor quantidade de ligante, e de menor qualidade, devido ao custo de produção da cal.

No século XVIII começou-se a utilizar argamassas à base de gesso e cal com diferentes aditivos destacando-se as gorduras vegetais e animais. O gesso aliado à cal permitia por um lado diminuir a retração associada a esta e por outro aumentar o reduzido tempo de presa que está associado ao gesso, (Coelho, 2009).

A cal com adição de pozolanas ou gesso foi o ligante mais utilizado na construção civil até ao século XX. No entanto, devido ao aparecimento do cimento Portland a utilização da cal na construção diminuiu, uma vez que o novo ligante tinha presa mais rapidamente permitindo menores tempos de execução dos trabalhos em obra e possuía melhores desempenhos mecânicos comparativamente às argamassas à base de cal, (Coelho, 2009).

Com a descoberta dos ligantes hidráulicos durante o século XVIII, as cals aéreas foram, gradualmente, substituídas por cals hidráulicas e no início do século XX maioritariamente por cimento Portland, um ligante com maior rapidez de endurecimento e com características mecânicas mais resistentes. Hoje em dia sabe-se que o uso de argamassas de cimento Portland na conservação e reparação de edifícios antigos foi uma escolha errada, sendo responsável por vários problemas em áreas reparadas, sendo frequentemente associado à origem de patologias, (Grilo et al., 2014).

Atualmente tem-se verificado que o cimento Portland não é o ligante ideal no processo de reabilitação de edifícios anteriores à década de 50 do século XX. Neste campo são frequentes as patologias

associadas ao facto da sua utilização ser quimicamente incompatível com argamassas à base de cal, sendo o cimento portland responsável pela introdução de sais solúveis, ser pouco permeável e ter um elevado módulo de elasticidade, o que não permite o acompanhamento das deformações de alvenarias existentes, (Coelho, 2009).

A utilização da cal tem associada diferentes características e possibilidades de aplicação. Sendo influenciada pelas matérias-primas disponíveis no solo, cada região tinha um número limitado de tipos de cais e inertes, (Mateus, 2002).

A distinção entre os diversos tipos de cal é explicado pelo modo como as cais eram utilizadas na construção. Mateus (2002) afirma ainda que, através da leitura de diferentes obras, é de realçar os cuidados na escolha das pedras a cozer, do processo de cozedura e dos critérios de qualidade.

Na sua produção, conscientemente ou não, sempre se obtiveram cais com presa só ao ar e cais que podiam fazer presa debaixo de água. A diferenciação entre a cal aérea e hidráulica era feita de forma intuitiva, e esta era utilizada em função dos fins a que se destinava, (Mateus, 2002).

Como matéria-prima, eram indicadas as pedras calcárias com maior densidade e peso, mais homogéneas, compactas e livres de impurezas até ao fim do século XVIII. Considerava-se também que a cal produzida a partir de mármore ou calcários muito compactos e cristalinos era a indicada. Segundo Vitruvius, para a produção de argamassas de reboco era utilizada cal produzida a partir de pedras porosas. Para obras hidráulicas eram adequados os calcários de cor cinzenta, possivelmente calcários argilosos ou margosos, eram indicados como matérias-primas, (Mateus, 2002).

A resistência da cal e da respetiva argamassa era associada, erroneamente, à dureza da pedra calcária primária, (Mateus, 2002).

Atualmente a matéria-prima a partir da qual se obtêm os produtos à base de cal hidráulica é a pedra calcária e margosa, composta quase exclusivamente por carbonato de cálcio.

Na Figura 2.1 encontra-se esquematizada a história das argamassas.

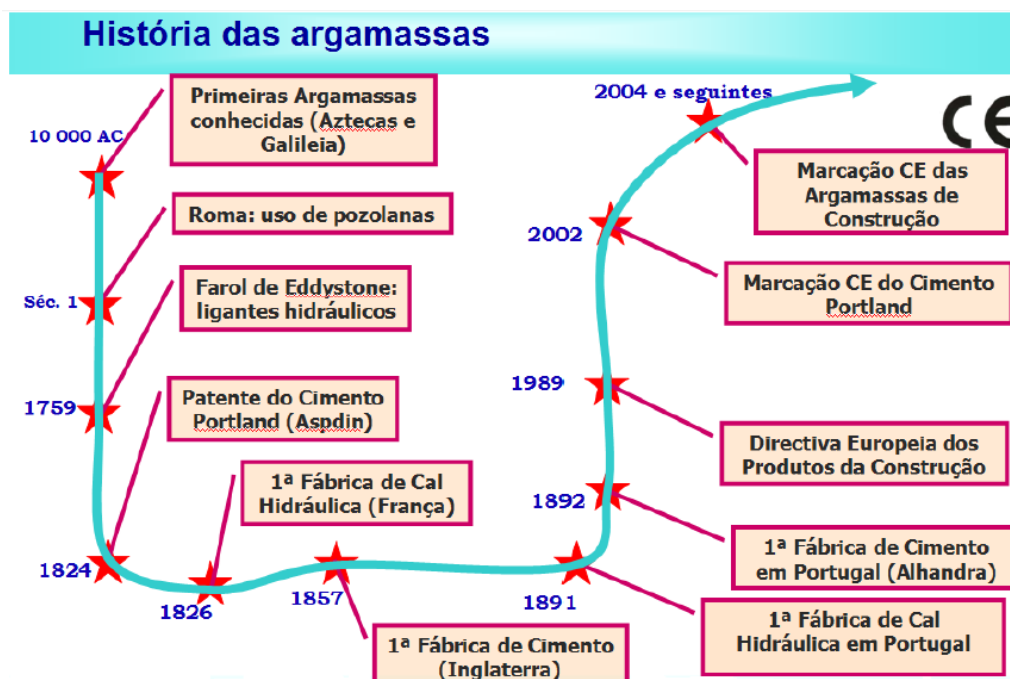


Figura 2.1 - História das argamassas: linha do tempo, (Almeida, 2010)

2.2. A CAL

A definição e diferença de características, comportamentos e aplicações entre as diversas variedades de cal, nomeadamente a aérea e hidráulica, tem sido alvo de diferentes confusões, (Leirós e Frade, 2004).

A pedra calcária composta quase exclusivamente por carbonato de cálcio e por um número limitado de outros constituintes é a matéria-prima a partir da qual se obtêm os produtos à base de cal. As impurezas que estão associadas aos carbonatos da pedra calcária são a sílica e os óxidos de ferro e de alumínio, em maior ou menor quantidade, (Coelho, 2009).

A cal é produzida pela calcinação da pedra calcária. As características e comportamentos da cal obtida é influenciada pelos teores de carbonato de cálcio, argilas e sílica presentes na matéria-prima, (Leirós e Frade, 2004).

Segundo os mesmos autores calcários com teores de CaCO_3 superiores a 95% produzem cais cálcicas ou aéreas e que a pedra calcária com presenças de Carbonato de Cálcio entre 75% e 95% e argilas entre 5 e 22% (margas) produzem cais hidráulicas naturais.

2.3. A CAL HIDRÁULICA NATURAL EM PORTUGAL

A produção de cal hidráulica em Portugal teve início em 1891, com a fundação da fábrica de Cimentos da Maceira, antecessora da Secil Argamassas. Devido ao aparecimento do cimento, a cal hidráulica passou a utilizar-se como constituinte de argamassa como único ligante ou em mistura com outros, passando a ter um papel complementar.

Atualmente a cal hidráulica é utilizada como único ligante ou misturada com outros ligantes hidráulicos ou aéreos. Este ligante é também utilizado na produção de argamassas de reabilitação, como único ligante, em execução de rebocos exteriores e interiores sobre suportes antigos, (Secil, 2014b).

2.3.1. CONSTITUIÇÃO

A cal hidráulica é constituída principalmente por hidróxido de cálcio, silicatos de cálcio e aluminatos de cálcio, esta ganha presa e endurece debaixo de água. O dióxido de carbono contribui, também, para o seu endurecimento através da reação com o hidróxido de cálcio, (Coelho, Torgal e Jalali, 2009).

As cais hidráulicas devido às matérias-primas utilizadas, calcários margosos com teores de argila entre os 5% e 20% (Laboratório Nacional de Engenharia, 1996) e, segundo Nero (2015), pela temperatura atingida durante a cozedura, 850-900 °C, apresentam índices de hidraulicidade entre o das cais aéreas e o dos cimentos, agregando compostos como o óxido de cálcio que é preponderante na cal aérea e o C_2S (silicato bicálcico) que se encontra na constituição do cimento.

O mesmo autor afirma que estes dois componentes permitem que a fase inicial de endurecimento da cal hidráulica seja devido à hidratação do C_2S sendo libertado reduzido calor de hidratação, evitando a evaporação da água de amassadura. O endurecimento deste ligante aumenta ao longo do tempo em contato com o ar, em condições de humidade relativa, HR, entre os 50% - 85%, devido à carbonatação do hidróxido de cálcio, resultante da hidratação do óxido de cálcio.

Nero (2015) refere ainda que a cal hidráulica, comparativamente à cal aérea, tem vantagens no que diz respeito à aderência aos suportes, no endurecimento inicial e nas retrações, e em relação ao cimento, apresenta menor rigidez que o mesmo, maior permeabilidade ao vapor e menos higroscopicidade. Além

disto, a presença reduzida de teores de aluminato tricálcico, de alcalis K_2O e Na_2O , e de gesso, confere bom comportamento a eventuais ataques dos sulfatos tornando improváveis reações alcalis agregados, em especial quando os agregados são de natureza siliciosa de origem metamórfica, (Nero, 2015).

2.3.2. PRODUÇÃO

A matéria-prima a partir da qual é produzida a cal, a pedra calcária, é extraída de uma pedreira, presente na Figura 2.2, que se encontra nas instalações da Secil Argamassas, Maceira, empresa onde este trabalho também foi desenvolvido. A pedra extraída alimenta o britador da Figura 2.4 que a montante possui um crivo que separa a fração argilosa, presente na Figura 2.3, da pedra calcária antes de esta entrar no britador. Depois de britada a pedra, há uma separação de finos que não entram nos fornos.

Para a alimentação dos fornos entram apenas pedras com dimensões superiores a 8 cm para permitir a admissão de ar nos fornos.



Figura 2.2 – Pedreira



Figura 2.3 - Exclusão da fração de argila



Figura 2.4 – Britador



Figura 2.5 - Tapete que transporta carvão



Figura 2.6 - Tapete que transporta a pedra calcária



Figura 2.7 - Local de junção da pedra com o carvão

Após o processo de britagem a pedra é misturada com o carvão e conduzida aos fornos, como se pode ver na Figura 2.5, Figura 2.6 e Figura 2.7. O forno é alimentado por cima com a mistura, dando-se início ao processo de cozedura. À medida que é retirada a pedra cozida da parte inferior do forno para vagões é colocado por cima nova mistura crua. Quando o forno se encontra cheio e o material à superfície apresenta algum brasido é um indicador que o material de baixo, colocado anteriormente, já se encontrando nas condições de ser retirado do forno. Durante o processo de cozedura há a admissão de ar nos fornos. Esta admissão de ar nunca é feita quando há retirada de material cozido para não desestabilizar a temperatura dentro do forno.

Após o processo de cozedura da pedra calcária, onde as temperaturas ideais de cozedura se encontram esquematizadas na Figura 2.8, forma-se óxido de cálcio e outros componentes. Na Figura 2.9 é possível observar a pedra calcária após o processo de cozedura. Este material é britado novamente e vai para uma câmara de hidratação, como demonstra a Figura 2.10, onde é apenas adicionada a quantidade necessária de água para hidratar o óxido de cálcio. Os outros componentes não podem sofrer o processo de hidratação, sendo apenas hidratados no momento em que é realizada a argamassa em obra.

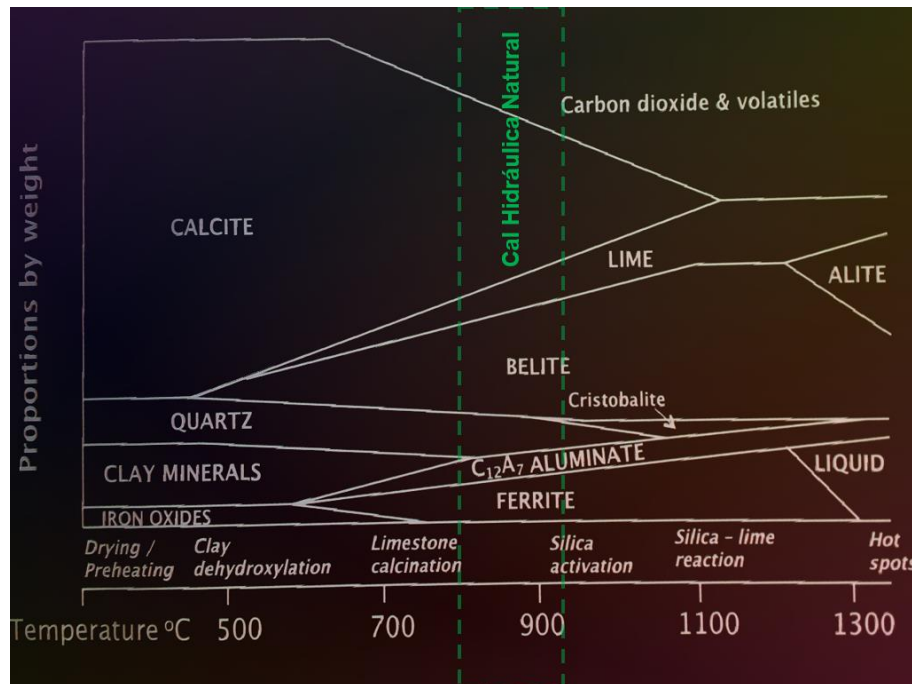


Figura 2.8 - Temperatura ideal na produção de cal hidráulica natural, (Secil, 2014a)



Figura 2.9 - Pedra calcária cozida antes da hidratação



Figura 2.10 - Câmara de hidratação

Após o processo de hidratação e moagem, o material é levado através de um transportador por arrasto para silos onde é ensacado e embalado para venda.

A cal hidráulica natural consegue reunir num único produto as características que se esperam obter das misturas de ligantes aéreos com matérias de reação hidráulica, como as pozolanas ou as matérias/resíduos cerâmicos moídos, (Leirós e Frade, 2004).

Pelo facto de ser mais barata e apresentar uma tonalidade acinzentada em contraste com a cal aérea, de preço mais elevado e de cor branca, aliado a algum desconhecimento este produto tem sido deixado para segundo plano no uso em rebocos. Importa referir que é necessário valorizar a cal hidráulica uma vez que em toda a Europa as fábricas de cal hidráulica foram gradualmente transformadas em fábricas de cimento ou de cal aérea, (Mascarenhas, 2006).

A cal hidráulica proporciona às argamassas uma boa trabalhabilidade, um aumento da resistência mecânica comparativamente às argamassa de cal aérea, boa aderência às superfícies, um bom acabamento, maior rentabilidade de mão-de-obra, melhorando consideravelmente a qualidade da construção civil, (Coelho, Torgal e Jalali, 2009).

2.4. DIFERENÇA ENTRE CAL HIDRÁULICA E CAL HIDRÁULICA NATURAL, SEGUNDO A NP EN 459

Segundo a NP EN 459-1, a cal hidráulica (HL) é um ligante constituído por cal e outros materiais como o cimento, escória granulada de alto-forno, cinzas volantes, filer calcário e outros materiais adequados. Este ligante ganha presa e endurece quando misturada com água e o dióxido de carbono do ar contribui para o seu endurecimento.

Já a cal hidráulica natural (NHL), segundo a mesma norma, é uma cal com propriedades hidráulicas produzida pela combustão de calcários mais ou menos argilosos ou siliciosos (incluindo giz) e redução a pó por extinção com ou sem moagem. Esta, tal como a HL tem a propriedade de fazer presa e endurecer quando misturada com água e por reação com o dióxido de carbono do ar (carbonatação). As propriedades hidráulicas resultam exclusivamente da composição química especial da matéria-prima natural. A cal hidráulica natural não contém quaisquer outros aditivos e são apenas permitidos agentes de moagem até 0,1%.

2.5. ARGAMASSAS À BASE DE CAL HIDRÁULICA NATURAL

Com o objetivo de ter uma base comparativa para os resultados obtidos nos diferentes ensaios procedeu-se à pesquisa de alguns estudos efetuados em argamassas à base de cal.

As argamassas em estudo visam a reparação de revestimentos de edifícios antigos. Há que realçar que a NP EN 998-1 exige que para argamassas de reparação a classe de resistência CSII, resistência a 28 dias entre 1,5 e 5,0 MPa.

Vários autores têm vindo a desenvolver trabalhos no sentido de estudar as propriedades de argamassas à base de cal hidráulica, variando os traços e granulometria dos agregados. Contudo, estes dados servem como complemento ao estudo aqui desenvolvido.

As Tabelas 2.1 e 2.2, (LNEC, 2006), fornecem as indicações que se devem ter em conta na escolha das argamassas a aplicar em elementos preexistentes.

Tabela 2.1 - Relação entre as características recomendadas para as argamassas e as características dos elementos preexistentes - características mecânicas, (LNEC, 2006)

Argamassa	Características mecânicas aos 90 dias			Aderência ao suporte (Ra)	Comportamento às forças desenvolvidas por retração restringida ($F_{r\max}$)
	Resistência à tração (R_t)	Resistência à compressão (R_c)	Módulo de elasticidade (E)		
Reboco exterior	Características mecânicas semelhantes às das argamassas originais e inferiores às do suporte			Resistência ao arrancamento (R_a) inferior à resistência à tração do suporte: a rotura não deve ser coesiva pelo suporte	Força máxima desenvolvida por retração restringida ($F_{r\max}$) inferior à resistência à tração do suporte
Reboco interior					

Tabela 2.2 - Relação entre as características recomendadas para as argamassas e as características dos elementos preexistentes - características não mecânicas, (LNEC, 2006)

Argamassa	Comportamento					Durabilidade
	À água (ensaios clássicos)			Aos sais	Características térmicas	
	Permeabilidade ao vapor de água	Coefficiente de capilaridade	Porosidade	Teores de sais solúveis	Características térmicas	Resistência a ações climáticas e aos sais
Reboco exterior	Semelhantes às das argamassas originais e superiores às do suporte		Porosidade e porosimetria semelhantes às das argamassas originais e com maior percentagem de poros grandes que o suporte	Reduzidos	Coeficiente de dilatação térmica e condutibilidade de térmica semelhantes aos das argamassas originais e à do suporte	Média a elevada
Reboco interior						

Vários autores têm procurado definir exigências para argamassas de substituição, contudo de forma intuitiva, (Veiga et al., 2004).

Veiga (2003b) refere que para definir as condições a respeitar pelas características da nova argamassa a utilizar seria necessário conhecer as características dos elementos pré-existent com os quais ela irá interagir. Estas características só poderiam ser conhecidas através de uma avaliação caso a caso para construções de elevado interesse histórico ou arquitetónico, não incluindo a grande maioria dos edifícios antigos.

A mesma autora recomenda, através da experiência acumulada, os limites para a maioria das paredes de alvenaria, que se encontram na Tabela 2.3 e Tabela 2.4, (Veiga, 2003b).

Tabela 2.3 - Requisitos estabelecidos para as características mecânicas das argamassas de revestimento para edifícios antigos, (Veiga, 2003b)

Uso	Características Mecânicas (MPa)			Aderência (MPa)	Comportamento à retracção restringida			
	Rt	Rc	E		F _{rmáx} (N)	G (N.mm)	CSAF	CREF (mm)
Reboco exterior	0,2 – 0,7	0,4 – 2,5	2000-5000	0,1 – 0,3 ou rotura coesiva pelo reboco	< 70	> 40	> 1,5	> 0,7
Reboco interior	0,2 – 0,7	0,4 – 2,5	2000-5000		< 70	> 40	> 1,5	> 0,7

Rt – Resistência à tracção; Rc – Resistência à compressão; E – Módulo de elasticidade; F_{rmáx} – Força máxima induzida por retracção restringida; G – Energia de rotura à tracção; CSAF – Coeficiente de segurança à abertura da 1ª fenda: CSAF = Rt/F_r max; CREF – Coeficiente de resistência à evolução da fendilhação: CREF = G/F_r max

Tabela 2.4 - Requisitos estabelecidos para as características de comportamento face à ação da água e ao clima das argamassas de revestimento para edifícios antigos, (Veiga, 2003b)

Uso	Comportamento à água					Envelhecimento artificial acelerado
	Ensaio clássico		Ensaio com humidímetro			
	S _D (m)	C kg/m ² .h ^{1/2}	M (h)	S (h)	H (mv.h)	
Reboco exterior	< 0,08	< 12; > 8	> 0,1	< 120	< 16 000	Médio: degradação moderada nos ciclos água/gelo
Reboco interior	< 0,10	-	-	< 120	-	

S_D - espessura da camada de ar de difusão equivalente (valor relacionado com a permeância); C - coeficiente de capilaridade; M: *atraso na molhagem*, em horas, definido como o período de tempo decorrente desde o momento da aplicação da água sobre o provete até a água atingir as sondas, considerando-se que tal acontece quando se verifica uma quebra de tensão eléctrica de 5%; S: *período de humedecimento*, em horas, definido como o período de tempo durante o qual o suporte permanece humedecido, considerando-se que tal acontece enquanto a tensão eléctrica se mantém abaixo de 95% do seu valor inicial; H: *intensidade de molhagem*, em mv x h, definida como a quantidade de molhagem sofrida durante o ensaio, ou seja a área situada entre a linha que define a variação da tensão eléctrica com o tempo e a linha correspondente ao valor da tensão no estado considerado seco, ou seja, de 95% do valor inicial.

Em Veiga et al. (2004) é referido ainda que em cada caso é importante verificar quais as exigências específicas que se deverão cumprir, além destes requisitos mínimos. Apenas em edifícios correntes de paredes de alvenaria de pedra, tijolo ou mistas sem valor patrimonial elevado as argamassas de revestimento poderão ser avaliadas através destes requisitos gerais.

2.5.1. MASSA VOLÚMICA

As argamassas com menores valores de massa volúmica em pasta apresentam maior facilidade na sua aplicação e até mesmo a execução de camadas com espessuras mais elevadas, (Sequeira et al., 2012).

Quanto à massa volúmica do produto endurecido os mesmos autores referem que esta é uma característica importante para as argamassas de reabilitação uma vez que é inversamente proporcional à porosidade aberta.

2.5.2. RESISTÊNCIAS MECÂNICAS

A resistência mecânica interna do reboco ou argamassa é a capacidade de este suportar os esforços mecânicos e as tensões que lhe estão associadas, os autores Gonçalves e Margarido (2012) citam Fontes (2011). A resistência da argamassa é influenciada pela intensidade das tensões que lhe são induzidas como das características resistentes da própria argamassa. A resistência de uma argamassa aumenta com o aumento da sua dosagem em ligante. No entanto, este excesso de ligante pode conduzir ao aumento da retração da argamassa levando à fendilhação da mesma, os mesmos autores citam Fontes (2011) e Veiga (1998).

Muitos estudos foram feitos para avaliar a resistência mecânica das argamassas à base de cal hidráulica natural. Estudos realizados por Rodrigues, Faria e Flores-Colen (2014) mostraram que a substituição de cal hidráulica natural por cal aérea hidratada conduziu à diminuição das resistências à tração por flexão e compressão comparativamente a argamassas formuladas exclusivamente à base de cal hidráulica natural. Os autores realçam que quanto maior é a substituição, maior é a diminuição das resistências mecânicas, obtendo-se argamassas com fraco desempenho mecânico, o que poderá comprometer a performance na aplicação como argamassas para reabilitação. Estes autores consideraram que as formulações mistas serão apenas viáveis quando se pretendem argamassas com curas rápidas.

2.5.3. MÓDULO DE ELASTICIDADE

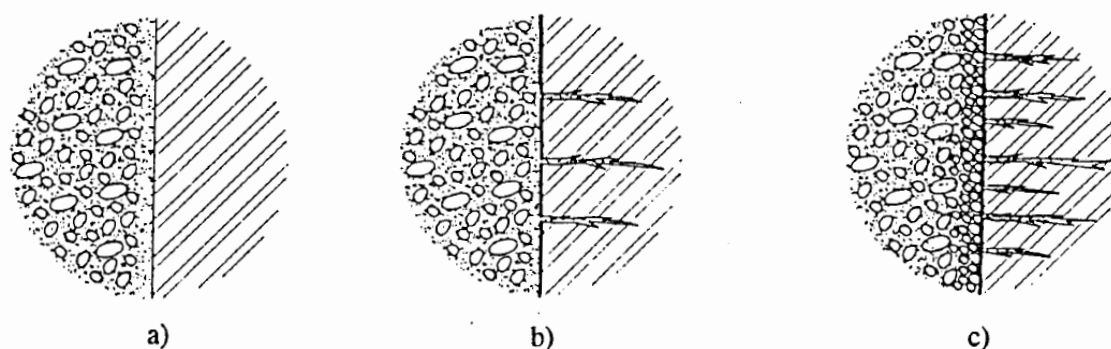
Os rebocos devem apresentar uma boa capacidade de deformação para que acompanhem as deformações do suporte sem fendilhar, (Gonçalves e Margarido, 2012).

Esta capacidade de deformação do revestimento endurecido é condicionada pelo módulo de elasticidade, retração e a resistência à tração, (Gonçalves e Margarido, 2012).

Os mesmos autores referem que o módulo de elasticidade pode ser determinado através de ensaios estáticos e dinâmicos, dependendo da velocidade de aplicação das solicitações e do modo de medição da resposta. O módulo de elasticidade estático corresponde à inclinação do diagrama tensão-deformação, obtido carregando um provete e medindo simultaneamente a deformação. Por outro lado, o módulo de elasticidade dinâmico corresponde a deformações instantâneas muito pequenas e é considerado igual ao módulo tangente inicial determinado no ensaio estático, sendo portanto maior do que o módulo de elasticidade estático. O módulo de elasticidade dinâmico pode ser determinado recorrendo à velocidade de propagação dos ultrassons ou à frequência ressonante da argamassa, uma vez que estes parâmetros dependem diretamente da elasticidade do material, (Gonçalves e Margarido, 2012).

2.5.4. ADERÊNCIA A DIFERENTES SUPORTES

A aderência é a capacidade do reboco resistir às tensões normais e tangenciais atuantes na interface com o suporte. A aderência do reboco ou argamassa ao suporte é uma característica essencial para a sua capacidade de impermeabilização e proteção das paredes ao longo do tempo, assim como a aderência entre as camadas constituintes do revestimento. Além disso, influencia bastante a resistência à fendilhação, condicionando a distribuição de tensões na argamassa, os autores Gonçalves e Margarido (2012) citam Veiga (1998) e Gaspar, Flores-Colen e Brito (2007). Gaspar, Flores-Colen e Brito (2007) acrescentam ainda que uma boa aderência entre o reboco e o suporte permite controlar a fendilhação, uma vez que as tensões internas que se surgem durante a retração são distribuídas uniformemente por toda a argamassa. Na Figura 2.11 é possível observar o mecanismo de aderência de um revestimento.



a) suporte com coeficiente de absorção muito baixo: a aderência mecânica é quase nula; b) suporte com coeficiente de absorção médio: uma parte da leitança penetra nos poros e cristaliza aí; c) suporte com coeficiente de absorção muito alto: *bomba* grande parte da leitança e *desseca* a película de argamassa junto ao suporte, que fica *queimada* (sem água suficiente para a sua hidratação).

Figura 2.11 - Mecanismo de aderência mecânica de um revestimento, (Veiga, 1998)

Nas argamassas tradicionais sem adjuvantes, a aderência processa-se por penetração capilar da água de amassadura nos poros do suporte que levam consigo o ligante para os mesmos. Deste modo e para que a ligação seja boa, é necessário que as partículas finas formem com a água uma pasta capaz de penetrar facilmente na alvenaria, endurecendo rapidamente, (Veiga, 1998).

As argamassas mais ricas em ligante e com maior quantidade de finos possuem maiores tensões de aderência. Contudo, o maior teor em ligante e finos pode levar a uma maior fendilhação por retração, que afetará negativamente a aderência, (Gonçalves e Margarido, 2012).

Nos rebocos não tradicionais é possível adicionar adjuvantes que funcionam como promotores de aderência, melhorando esta característica do estado endurecido, Gonçalves e Margarido (2012) citam Veiga (1998).

A porosidade e a capacidade de absorção de um suporte influencia a aderência da argamassa. Esta será melhor em suportes absorventes, pois estes permitem uma melhor infiltração da água de amassadura melhorando a ligação mecânica. No entanto, a absorção de água exagerada do suporte poderá levar à secagem rápida da argamassa, impedindo a hidratação dos seus componentes e favorecendo a formação de uma interface pulverulenta, Gonçalves e Margarido (2012) citam Veiga (1998).

Os mesmos autores referem ainda que é de realçar a compatibilidade com o suporte, ao nível da resistência e módulo de elasticidade, para evitar que se gerem tensões na interface que prejudiquem a aderência.

2.5.5. COMPORTAMENTO FACE À AÇÃO DA ÁGUA

Segundo Gonçalves e Margarido (2012) que citam Gaspar (2003), os rebocos são argamassas porosas, por onde a água pode penetrar por capilaridade ou por permeabilidade, dependendo da dimensão dos poros.

Na reabilitação, o revestimento deve permitir as trocas de vapor de água entre o suporte e o exterior, para minimizar a ocorrência de condensações entre as superfícies de contato do reboco e do suporte. Além disto, há que ter em conta a permeabilidade ao vapor de água da camada de acabamento do reboco que, se por um lado funciona como primeira barreira à entrada de água no reboco, por outro, deve

permitir a “respiração” da parede decorrente das atividades humanas no interior, Gonçalves e Margarido (2012) citam Gaspar (2003).

Gonçalves e Margarido (2012) referem que a capacidade de hidrofugação dos rebocos consiste na capacidade de:

- Aumentar o tempo que a água demora até atingir o suporte;
- Limitar a quantidade de água que atinge o suporte;
- Diminuir o tempo em que a água está em contacto com o suporte, devendo promover a secagem do revestimento.

2.5.5.1. Capilaridade e permeabilidade ao vapor

No que diz respeito ao comportamento face à ação da água das argamassas de cal hidráulica natural estudos desenvolvidos por Rodrigues, Faria e Flores-Colen (2014) concluíram que estas argamassas têm bom desempenho e são adequadas para a aplicação no exterior pois satisfazem as exigências definidas na bibliografia no que diz respeito ao coeficiente de capilaridades aos 28 e 90 dias e ao coeficiente de permeabilidade ao vapor.

Assim, segundo os mesmos autores, as argamassas à base de cal hidráulica natural são adequadas como argamassas de substituição em trabalhos de reabilitação de edifícios antigos.

2.5.5.2. Porosidade acessível à água

A durabilidade das argamassas está relacionada com a sua estrutura porosa e porometria pois estas propriedades influenciam o comportamento à água dos rebocos aplicados, no que diz respeito à absorção e secagem de água, Gonçalves e Margarido (2012) citam Coelho (2009).

A porosidade aberta relaciona-se com os vazios que comunicam entre si, permitindo a circulação de fluidos no seu interior (o material é mais ou menos permeável em função das dimensões e da geometria dos poros, e da ligação da rede porosa), Gonçalves e Margarido (2012) citam Rato (2006).

2.5.6. CICLOS DE GELO/DEGELO

A água é um dos principais agentes de deterioração para as argamassas pois é devido aos ciclos gelo-degelo da água que esta ocorre. Este processo é extremamente agressivo para as argamassas, sendo considerado mesmo mais agressivo que a cristalização de sais. Os ciclos de gelo-degelo são um processo pelo qual a água no interior dos poros da argamassa cristaliza e liquidifica sucessivamente, (Santos, Frade e Pereira, 2014).

A resistência de uma argamassa aos ciclos de gelo-degelo depende da sua capacidade para resistir à penetração de água e de uma estrutura porosa que permita resistir à tensão provocada pelo aumento de volume da água quando solidifica, (Santos, Frade e Pereira, 2014).

A estrutura porosa é determinante para a resistência mecânica, a permeabilidade ao vapor e a resistência aos ciclos gelo-degelo de uma argamassa. Se os poros não estiverem saturados, os problemas associados ao fenómeno de gelo-degelo serão minimizados, uma vez que é permitido absorver o aumento de volume associado ao processo de congelação, mas no caso dos poros se encontram saturados, este processo origina tensões que são exercidas nas paredes dos poros provocando fissuração e posterior desagregação, (Santos, Frade e Pereira, 2014).

A cal hidráulica é um ligante que aumenta a porosidade das argamassas, especialmente, devido à estrutura porosa que se forma quando se dá a hidratação dos silicatos bicálcicos nela presentes, (Santos, Frade e Pereira, 2014).

Segundo estudos efetuados pelos mesmos autores as argamassas formuladas com cal hidráulica natural apresentam bom desempenho no que respeita à resistência aos ciclos de gelo-degelo.

Estudos realizados por Veiga (2003a) referem que os ensaios de envelhecimento acelerado como os ciclos de calor/gelo, calor/chuva e chuva/gelo mostraram que as argamassas de cal aérea são as que pior resistem às ações climáticas e que a degradação mais precoce se dá por descolagem do suporte seguida de destacamento.

2.5.7. RETRAÇÃO

Segundo Coelho (2009), a retração está relacionada com a diminuição de volume de uma argamassa, quer por evaporação da água da amassadura quer devido à hidratação e a carbonatação do ligante. A retração condiciona de forma decisiva a durabilidade de uma argamassa, uma vez que promove a fissuração por retração, permitindo a infiltração de elementos que aumentam a sua deterioração. O estudo da retração pode ser feito por medição da variação das dimensões de provetes de argamassa, designada por retração livre, ou pela análise da existência ou não de fendilhação num reboco após a sua aplicação num determinado suporte, denominada por retração restringida.

Veiga e Souza (2004) realçam o conhecimento do fenómeno de retração e da sua evolução no controlo das suas causas e na minimização dos seus efeitos. Relativamente aos ensaios utilizados no estudo da retração, estes autores referem que os ensaios de retração livre apresentam alguma dispersão de resultados relacionados com a heterogeneidade dos materiais e com o fator humano associado à sua preparação. Tendo por base os estudos realizados pelos mesmos autores as argamassas à base de cal hidráulica natural possuem menor retração que as argamassas à base de cal aérea.

2.5.8. RESISTÊNCIA AOS SAIS

A ação dos sais solúveis é uma causa frequente de degradação em edifícios antigos, conduzindo a problemas estéticos, diminuição das condições de habitabilidade, perda de vestígios históricos ou mesmo a redução da segurança estrutural. A degradação, explicado na Figura 2.12, ocorre devido à presença simultânea de sais solúveis e água num material poroso sujeito a determinadas condições ambientes. Os sais poderão ser provenientes dos próprios materiais de construção ou ter origem externa. Em contacto com água, formam soluções que migram no interior dos materiais porosos. A degradação ocorre quando os sais cristalizam na superfície do material (formando eflorescências) ou no interior dos poros (formando subflorescências que podem introduzir tensões internas no material). A cristalização dá-se durante processos evaporativos de secagem e quando é atingido o grau de saturação em sais, podendo as variações de temperatura ter influência no caso dos sais cuja solubilidade é sensível a este parâmetro, (Puim, Gonçalves e Brito, 2012).

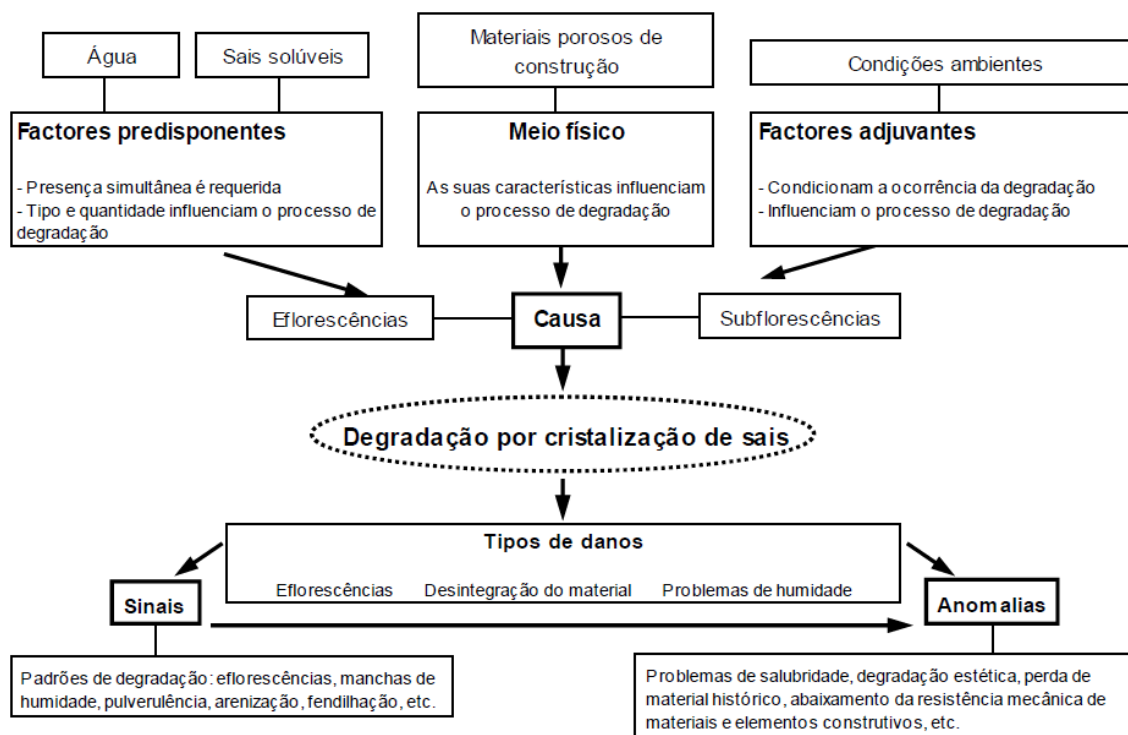


Figura 2.12 - Patologia da degradação por sais, (Puim, Gonçalves e Brito, 2012)

Existe um conjunto de sais que são transportados para o interior de materiais e cristalizam no seu interior provocando perdas de coesão por expansão. Deste modo é importante que as argamassas de reabilitação de alvenarias antigas sejam compatíveis quimicamente com os suportes, ou seja, devem resistir aos sais solúveis eventualmente existentes nas paredes e devem limitar o teor de sais solúveis a transmitir às mesmas, (Oliveira et al., 2007).

As argamassas à base de cimento portland são uma fonte disponível de iões capazes de originar sais que levam à degradação dos revestimentos e dos suportes, sendo então totalmente desaconselhadas para a reabilitação de revestimentos de edifícios antigos, (Oliveira et al., 2007).

Estudos efetuados por (Oliveira et al., 2007) mostraram uma relação direta entre propriedades como porosidade aberta e capacidade de absorção de água dos materiais e a resistência à ação dos sais, por parte dos mesmos. No caso de pedras com maior porosidade, que apresentam superior capacidade de absorção de água, tendem a ganhar maior acumulação de sais e, por conseguinte, apresentam menor resistência á ação dos mesmos.

2.6. BIBLIOGRAFIA

- Almeida, J. (2010). *Argamassas tradicionais e industriais de alvenaria em edifícios*. Porto: [s. n.].
- Coelho, A. (2009). *A Cal na Construção*.
- Coelho, A., Torgal, F. P., Jalali, S. (2009). *A Cal na Construção*.
- Fontes, A. (2011). *Influência das condições de cura na carbonatação de argamassas tradicionais em ligante à base de cal aérea - Métodos de análise*.
- Gaspar, P. (2003). *Metodologia para o cálculo da durabilidade de rebocos exteriores correntes*. Lisboa

- Gaspar, P., Flores-Colen, I., Brito, J. (2007). Técnicas de Diagnóstico e Classificação de Anomalias por Perda de Aderência em Rebocos. In *2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção*. Lisboa: 2007. APFAC.
- Gonçalves, M., Margarido, F. (2012). *Ciência e engenharia de materiais de construção*. Lisboa: IST Press. ISBN 978-989-8481-17-7.
- Grilo, J., Faria, P., Veiga, R., Santos Silva, A., Silva, V., Velosa, A. (2014). New natural hydraulic lime mortars – Physical and microstructural properties in different curing conditions. *Construction and Building Materials*, 54:0. 378-384. ISSN 0950-0618.
- Laboratório Nacional De Engenharia Civil (1996). *Curso de especialização sobre revestimentos de paredes*. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil. ISBN 972-49-1674-X.
- Leirós, A., Frade, D. (2004). A cal hidráulica natural como material de reabilitação. *Actas do Congresso Nacional da Construção - Construção 2004: Repensar a Construção*,
- LNEC (2006). *Guia técnico de reabilitação habitacional*. Lisboa: Instituto Nacional de Habitação. ISBN 972-49-2081-X.
- Mascarenhas, J. (2006). *Sistemas de construção descrição ilustrada e detalhada de processos construtivos utilizados correntemente em Portugal*. Lisboa: Livros Horizonte. ISBN 972-24-1339-2 (vol. 1).
- Mateus, J. (2002). *Técnicas tradicionais de construção de alvenarias <<a>> literatura técnica de 1750 a 1900 e o seu contributo para a conservação de edifícios históricos*. Lisboa: Livros Horizonte. ISBN 972-24-1234-5.
- Nero, J. (2015). Uma reflexão sobre a prescrição de argamassas de revestimento no nosso edificado. *Anteprojectos*,
- NP EN 459-1:2011. *Cal de construção Parte 1: Definições, especificações e critérios de conformidade*. Caparica, Portugal.: IPQ. 50 p-50 p p.
- NP EN 998-1:2013. *Especificação de argamassas para alvenarias Parte 1: Argamassas para rebocos interiores e exteriores*. Portugal: IPQ. 23 p-23 p p.
- Oliveira, S., Barros, O., Seabra, M.P., Silva, L., Labrincha, J.A., Ferreira, V. (2007). Comportamento de Argamassas e Elementos de Alvenaria Antiga Sujeitos à Acção de Sais. In *2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção*. Lisboa: 2007. APFAC.
- Puim, P., Gonçalves, T., Brito, V. (2012). Controlo e prevenção de anomalias devidas à cristalização de sais solúveis em edifícios antigos. In *4º Congreso de patología y rehabilitación de edificios. PATORREB 2012*. Santiago de Compostela, Espanha: 2012.
- Rato, V. (2006). *Influência da Microestrutura Morfológica no Comportamento da Argamassa*. Lisboa: FCT/UNL.
- Rodrigues, A., Faria, P., Flores-Colen, I. (2014). Argamassa industrial para a reabilitação de rebocos antigos. In *I Simpósio de Argamassas e Soluções Térmicas de Revestimento*. Coimbra: 2014.
- Santos, A., Frade, D., Pereira, R. (2014). Comportamento de argamassas à base de cal hidráulica natural ao gelo-degelo. In 2014.
- Secil Argamassas (2014a). *A cal hidráulica natural, o ligante de eleição na reabilitação*.
- Secil Argamassas (2014b). *Ficha Técnica Secil Natural Lime NHL 3,5*.

Sequeira, C., Santos, A., Frade, D., Gonçalves, P. (2012). Análise de diferentes ligantes na formulação de argamassas industriais de reabilitação. In *4º Congresso Nacional de Argamassas de Construção. PATORREB 2012*. Santiago de Compostela, Espanha: 2012.

Veiga, M. (1998). *Comportamento de argamassas de revestimento de paredes contribuição para o estudo da sua resistência à fendilhação*. Lisboa: LNEC. ISBN 972-49-1757-6.

Veiga, M. (2003a). Argamassas para revestimento de paredes de edifícios antigos. Características e campo de aplicação de algumas formulações correntes. In *Actas do 3º ENCORE, Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios*. Lisboa: 2003a. LNEC.

Veiga, M. (2003b). *As argamassas na conservação*. Lisboa: LNEC. ISBN 972-49-1991-9.

Veiga, M., Aguiar, J., Silva, A., Carvalho, F. (2004). *Conservação e renovação de revestimentos de paredes de edifícios antigos*. Lisboa: LNEC. ISBN 972-49-2009-7.

Veiga, M., Souza, R. (2004). Metodologia de avaliação da retracção livre das argamassas desde a sua desmoldagem *Revista Engenharia Civil*

3

PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1. INTRODUÇÃO

Desde cedo o homem recorreu à argamassa para proteger e reforçar as suas construções, com revestimentos de superfícies, mesmo antes de as utilizar entre as pedras, com a finalidade de as melhor fixar entre si, (Branco, 1993).

Os revestimentos exteriores dos edifícios apresentam grande diversidade de constituição e de acabamento, tendo variado ao longo dos séculos, com o tipo de suporte, com a localização das construções e com a respetiva tipologia, (Veiga, 2011).

O reboco tradicional é aplicado em várias camadas. Quando o reboco é constituído por uma só camada, monomassa, qualquer fenda atinge toda a sua espessura. Em contrapartida, quando o reboco é constituído por várias camadas é difícil existir uma continuidade da fendilhação pelas três camadas. Cada camada é aplicada antes de a precedente ter endurecido completamente, (Mascarenhas, 2006).

A utilização da cal como ligante quase único implicava um modelo de constituição multicamada, em que cada camada principal, obtida a partir de várias subcamadas tinha funções específicas: camadas de regularização e proteção (emboço, reboco e esboço) e camadas de proteção, acabamento e decoração (barramento ou guarnecimento, pintura simples ou de ornamentação), (Veiga, 2011).

As várias camadas de regularização e proteção dos revestimentos exteriores eram realizadas com diferentes traços e composições conforme a natureza dos materiais usados, as características do suporte e o fim a que se destinavam, (Veiga, 2011).

As argamassas a usar em revestimentos de edifícios antigos têm que ter alguma resistência mecânica mas um módulo de elasticidade reduzido; uma certa capacidade de impermeabilização mas, principalmente, uma permeabilidade ao vapor de água particularmente elevada e uma grande facilidade de secagem; não podem conter sais solúveis em quantidades significativas; para minimizar as tensões devidas a deformações diferenciais, devem ter características físicas semelhantes às da alvenaria, nomeadamente no que se refere a módulo de elasticidade e a coeficiente de dilatação térmica e higrométrica, (Veiga, 2006). É importante enfatizar que estas funções são garantidas pelo revestimento no seu conjunto e não por uma única camada de argamassa, executada em condições normalizadas, que é geralmente o objeto de ensaio. Assim, o número de camadas, a respetiva espessura, a composição relativa dessas camadas e a tecnologia de aplicação são aspetos tão importantes como o material utilizado, (Veiga, 2006).

3.1.1. CAMADAS CONSTITUINTES DE UM REBOCO

Os requisitos das argamassas devem ser assegurados pela solução de reboco, ou seja pelo conjunto das várias camadas que o constituem. Para os rebocos correntes executados em obra, são recomendadas pelo menos três camadas: chapisco ou camada de aderência, camada de base e camada de acabamento. Estas camadas devem obedecer à regra da degressividade do teor de ligante no sentido alvenaria-exterior, para que o revestimento seja mais poroso e mais deformável do interior para o exterior. Cada camada tem uma função principal diferente e deve ter uma dosagem específica, pois as várias funções implicam características diferentes e por vezes contraditórias da argamassa, (Veiga, 2006).

O conjunto das três camadas deveria ter uma espessura de 15 a 30 mm. Quando a irregularidade das alvenarias exigia espessuras superiores, recomendava-se a execução prévia de uma camada com encasques em que se usavam fragmentos de tijolo ou de pedra, ou “armava-se” a camada de emboço com “grandes agregados” ou com fibras vegetais ou animais ou ainda redes metálicas, para aumentar a resistência da camada e evitar a sua fácil desagregação com o tempo, (Veiga, 2011)

A primeira camada, denominada por salpico, chapisco ou crespido é bastante fluida, rugosa, com elevada dosagem de ligante, destinada a homogeneizar a absorção do suporte e a estabelecer a ligação com a alvenaria, (Veiga, 2006). Esta tem como funções consolidar a superfície do suporte, reduzir a absorção da água das argamassas das camadas seguintes e melhorar a aderência ao suporte. Esta pode ser constituída por cal hidráulica e areia de rio com o traço de 1:5 e com a espessura máxima de 5 mm, (Mascarenhas, 2006).

A segunda camada, designada por camada de base ou reboco, é destinada a promover a regularização e a impermeabilização, (Veiga, 2006). Esta deve garantir a planeza e a verticalidade, deve ter uma espessura de 10 a 20 mm e ainda um traço de cal hidráulica e areia de 1:3, onde 2 porções de areia são de rio e 1 porção de areia da mina. Nesta camada é importante a dosagem de cal pois vai garantir a trabalhabilidade da argamassa e retardar a presa para dar tempo aos trabalhos de regularização da superfície, (Mascarenhas, 2006).

A terceira camada, camada de acabamento, é constituída por uma argamassa mais fina, de menor granulometria e mais fraca que as anteriores, vocacionada para proteção e para conferir um acabamento esteticamente aceitável, que será depois complementado, por exemplo, por uma pintura, (Veiga, 2006). Esta camada deve ter uma espessura máxima de 5 mm e traço de cal hidráulica e areia de 1:4 onde a fração de areia é constituída por 3 porções de areia de rio e 1 da mina, (Mascarenhas, 2006).

Contudo, é de destacar que os traços volumétricos sugeridos por Mascarenhas (2006) não respeitam a regra da degressividade do teor de ligante, recomendada por Veiga (2006), uma vez que composições com agregados de menores dimensões permitem o aumento da dosagem de ligante. Assim, estas necessitam de maiores quantidades de água para ficarem trabalháveis, o que as torna porosas e menos resistentes.

As três camadas encontram-se esquematizadas na Figura 3.1.

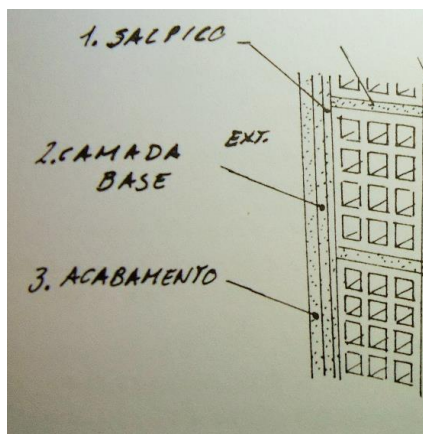


Figura 3.1 - Camadas constituintes do revestimento exterior em argamassa, (Mascarenhas, 2006)

O encasque é uma operação prévia da regularização, que deve ser evitada, mas é indispensável quando existam irregularidades tais que para a execução do emboço e do reboco é necessário atingir, em alguns pontos, espessuras superiores a 25 mm. Nestes casos a regularização simplesmente com argamassa exige a aplicação de espessuras tais, que a retração das mesmas provoca a sua descolagem da base, acabando por se destacar e cair toda a camada de enchimento, (Branco, 1993).

O encasque utiliza-se especialmente nas construções de alvenaria de pedra irregular, quando a qualidade da pedra não permite a formação de superfícies regulares no tosco. Este deve fazer-se por camadas não superiores a 3 cm de espessura, e devem aplicar-se escassilhos de pedra ou fragmentos de tijolo. As camadas aplicam-se umas sobre as outras, depois da camada anterior ter endurecido e retraído o bastante para receber novas argamassas, (Branco, 1993).

3.1.2. CLASSIFICAÇÃO DAS ARGAMASSAS SEGUNDO A NP EN 998-1

Com base na NP EN 998-1, as argamassas podem ser classificadas segundo diversos tipos: de acordo com a conceção, com o processo produtivo e com as propriedades e/ou utilização.

As argamassas para rebocos segundo a conceção podem ser:

- Argamassas de desempenho, cuja composição e processo produtivo são escolhidos pelo produtor a fim de atingir propriedades específicas.
- Argamassas de formulação, produzidas com proporções predeterminadas, cujas propriedades são consideradas resultantes das proporções declaradas para os constituintes.

As argamassas de acordo com o processo produtivo:

- Argamassas industriais, onde são doseadas e misturadas em fábricas. Estas podem ser fornecidas como argamassa “seca” com mistura pronta que necessita apenas de adição de água, ou argamassa em pasta, “fresca” que é fornecida pronta a usar;
- Argamassas industriais semi-acabadas:
 - Argamassas pré-doseadas, cujos constituintes são totalmente doseados em fábrica, fornecidas ao estaleiro da obra e aí misturadas segundo as especificações e condições indicadas pelo produtor;
 - Argamassas pré-misturadas de cal e areia cujos constituintes são totalmente doseados e misturados em fábrica, fornecidas ao estaleiro da obra, onde outros constituintes especificados, ou fornecidos pela fábrica, lhes são adicionados.

- Argamassas preparadas em obra, compostas por constituintes individuais doseados e misturados em obra.

As argamassas para reboco podem ser classificadas de acordo com as suas propriedades e/ou utilização em:

- Argamassas de uso corrente para rebocos, sem características especiais.
- Argamassas aligeiradas, de desempenho para rebocos com uma massa volúmica endurecida em seco inferior a um valor especificado.
- Argamassas coloridas
- Argamassas monomassa, para rebocos exteriores, aplicadas numa camada que preenche todas as funções de um sistema multicamada utilizado no exterior e que são geralmente coloridas.
- Argamassas de renovação, utilizadas em paredes de alvenaria com humidades contendo sais solúveis em água, apresentando alta porosidade e permeabilidade ao vapor e reduzida ação capilar.
- Argamassas de isolamento térmico, com propriedades específicas de isolamento térmico.

O caso em estudo foca-se nas diferenças de acordo com o processo produtivo, argamassas industriais e argamassas feitas em obra, com função de argamassa de renovação, segundo a NP EN 998-1.

3.1.3. ARGAMASSA INDUSTRIAL

As argamassas industriais, ou argamassas prontas, são caracterizadas por serem pré-doseadas em fábrica sendo vendidas em sacos ou a granel que já contêm as proporções pré-definidas de agregado(s), ligante(s) e, eventualmente, adjuvantes. Em obra, torna-se apenas necessário misturá-las com água (normalmente o fabricante na ficha técnica do produto estabelece a dosagem de água de amassadura a incorporar na mistura, em função da massa de produto pré-doseado), (Lauria et al., 2006). Este tipo de produto tem como vantagem, em relação às argamassas tradicionais, o facto de ser praticamente isento de sais solúveis.

A argamassa industrial em estudo é a REABILITA Cal Reboco, formulada exclusivamente a partir de cal hidráulica natural. Esta argamassa incorpora agregados siliciosos, calcários e adições. O REABILITA Cal Reboco foi concebido para conservação e reabilitação do edificado, sendo destinado ao revestimento de alvenarias antigas ou de construção nova. É aplicado como camada de enchimento e regularização em suportes antigos consolidados ou diretamente sobre os suportes quando estes apresentarem as características físicas e mecânicas apropriadas, (Secil, 2012).

Este produto, segundo indicações do fabricante, tem na sua composição produtos hidrofugantes, introdutores de ar, celulose e fibras.

Os introdutores de ar permitem melhorar a estrutura porosa da argamassa, obtendo esta quando é amassada com água um aumento significativo de poros que se conservam após o seu endurecimento e uma melhor distribuição e maior quantidade de poros. Este aditivo melhora a trabalhabilidade uma vez que funciona como fluidificante aligeirando as argamassas e substituindo parte da água de amassadura, (Santos, Frade e Pereira, 2014). A melhoria da estrutura porosa reduz a massa volúmica e o módulo de elasticidade melhorando o comportamento à fendilhação, (Gonçalves e Margarido, 2012).

No entanto, o aumento de porosidade faz com que a argamassa tenha menores resistências mecânicas, podendo afetar negativamente a aderência, (Gonçalves e Margarido, 2012).

As fibras destinam-se a aumentar a resistência mecânica e a ductilidade do revestimento ajudando a colmatar as desvantagens originadas pelos introdutores de ar na redução da resistência da argamassa, (Gonçalves e Margarido, 2012).

A presença de produtos hidrofugantes nesta argamassa pretende proteger a rede porosa de infiltrações de água. Uma vez que há uma melhoria da estrutura porosa conferida pelos introdutores de ar é importante proteger o revestimento da penetração de água, (Gonçalves e Margarido, 2012).

Por fim, a celulose é um agente retentor de água que funciona como espessante da argamassa limitando os riscos de dessecação prematura da mesma devido à absorção de água pelo suporte e por evaporação em tempo quente, tornando a argamassa menos sensível às condições climáticas e aos suportes demasiado absorventes, (Gonçalves e Margarido, 2012).

3.1.4. ARGAMASSA TRADICIONAL

As argamassas tradicionais são preparados no local da obra e aplicados em três ou quatro camadas, (Mascarenhas, 2006).

A argamassa tradicional em estudo é composta pelo ligante Secil Natural Lime NHL 3,5, que é uma cal hidráulica natural. Este ligante é constituído por silicatos e aluminatos de cálcio e hidróxido de cálcio, obtido pela cozedura de calcário margoso, seguida de moagem. Este ligante é classificado como NHL 3,5 segundo a NP EN 459-1, (Secil, 2014).

Este ligante deve ser utilizado para a fabricação de argamassas de reabilitação em execução de rebocos exteriores e interiores sobre suportes antigos, (Secil, 2014).

Os agregados utilizados nesta argamassa foram de dois tipos, areia de rio Tejo lavada e areia de Rio Maior, sendo caracterizados mais tarde.

O traço volumétrico de argamassa recomendado pelo fabricante foi de 1:3 (ligante:areia).

Para estabelecer as características da argamassa tradicional, um dos principais objetivos foi a realização de uma argamassa com granulometria o mais semelhante possível com a argamassa industrial em estudo. Como tal, foram sujeitas a ensaios de produto em pó e produto em pasta, quatro argamassas com traço volumétrico 1:3 (ligante:areia) com combinações de areia diferentes:

- Cal com areia de rio Tejo lavada (Argamassa 1)
- Cal com areia de Rio Maior (Argamassa 2)
- Cal com 1/2 de volume de areia do rio Tejo lavada e 1/2 de volume de areia de Rio Maior (Argamassa 3)
- Cal com 1/3 de volume de areia do rio Tejo lavada e 2/3 de volume de areia de Rio Maior (Argamassa 4)

As composições foram submetidas a ensaios de produto em pó e em pasta para estudar as suas características e averiguar qual a melhor composição e materiais constituintes a adotar para os ensaios de produto endurecido.

O traço volumétrico de argamassa tradicional definido foi de 1:1,1:1,1:0,60 (cal hidráulica natural:areia de rio Tejo: areia de Rio Maior:água) da Argamassa 3. Este traço tinha a curva granulométrica mais semelhante relativamente à argamassa industrial, bom espalhamento, percentagem de água de amassadura recomendada e boa trabalhabilidade, como alguns ensaios o demonstraram.

As quantidades de material utilizados para cada amassadura, do traço definido, foram de: 750 g de areia do rio Tejo lavada, 820 g de areia de Rio Maior, 296 g de Cal Hidráulica Natural e 280 g de água, cujo traço em peso é de 1:5,304:0,946 (cal:areia:água).

Os provetes de argamassa tradicional ficaram 48h nas formas para que adquirissem resistência suficiente para serem desenformados.

3.1.5. PROCESSO DE AMASSADURA DAS ARGAMASSAS E PROCESSO DE FABRICO DOS PROVETES

O processo de amassadura das argamassas consistiu em fazer a mistura a uma velocidade lenta durante 30 segundos. No final desse tempo raspou-se a argamassa do fundo do recipiente para que todo o material ficasse bem misturado e colocou-se novamente o recipiente no misturador, reiniciando-se a mistura, à mesma velocidade, durante 60 segundos. No final avaliou-se a trabalhabilidade da argamassa através do seguinte procedimento: a argamassa deve escorregar rapidamente quando se coloca a espátula na posição vertical e quando esta for colocada na posição horizontal, a argamassa deve ficar sob a espátula e permanecer aderente, para ter boa trabalhabilidade. Este processo de amassadura está de acordo com o procedimento descrito na EN 1015-2.

Na execução dos provetes de dimensões de 160 x 40 x 40 mm, encheu-se o molde com argamassa em duas camadas aproximadamente iguais, compactadas com 25 pancadas cada uma. Retirou-se o excesso com uma régua e nivelou-se a superfície da argamassa pelo bordo superior do molde, como especificado na EN 1015-11 ponto 7.2.2.

3.2. ENSAIOS REALIZADOS

3.2.1. PRODUTO INDUSTRIAL E MISTURAS EM SECO

3.2.1.1. Granulometria das areias, do produto industrial e das misturas em seco

Para que a amostra fosse a mais significativa possível esquartelaram-se as argamassas em pó e as areias antes de as sujeitar à peneiração mecânica.

Para a esquartelar e obter posteriormente a amostra foram utilizados cerca de 2 kg do material, tanto para as areias como para as argamassas em pó, a peneirar. Este foi colocado sobre a bancada e cuidadosamente misturado, como se pode ver na Figura 3.2. Após efetuar a mistura, colocou-se o material num monte que posteriormente foi comprimido e dividido em duas partes, como se pode observar na Figura 3.3, Figura 3.4 e Figura 3.5. Essas duas metades foram divididas em duas partes, resultando 4 quartos da amostra, onde foram desprezados os dois quartos diagonais. Os dois quartos restantes foram misturados e o processo foi repetido até se obter uma amostra próxima e superior a 200 g, como referido na EN NP 933-1.



Figura 3.2 - Mistura da argamassa em seco



Figura 3.3 - Divisão em duas partes da argamassa em seco



Figura 3.4 - Divisão em quatro partes da argamassa em seco



Figura 3.5 - Exclusão dos quartos diagonais



Figura 3.6 - Aparelho de peneiração mecânica

As amostras foram sujeitas à peneiração, num aparelho de peneiração como mostra a Figura 3.6, durante 24 minutos com a amplitude de 1,5 mm. Efetuadas as pesagem dos peneiros, as amostras não foram reaproveitadas. A metodologia adotada teve por base os conhecimentos de um técnico experiente e indicações do fabricante. Os resultados obtidos podem ser observados na Figura 3.7, Figura 3.8, Figura 3.9, Figura 3.10, Figura 3.11 e Figura 3.12.

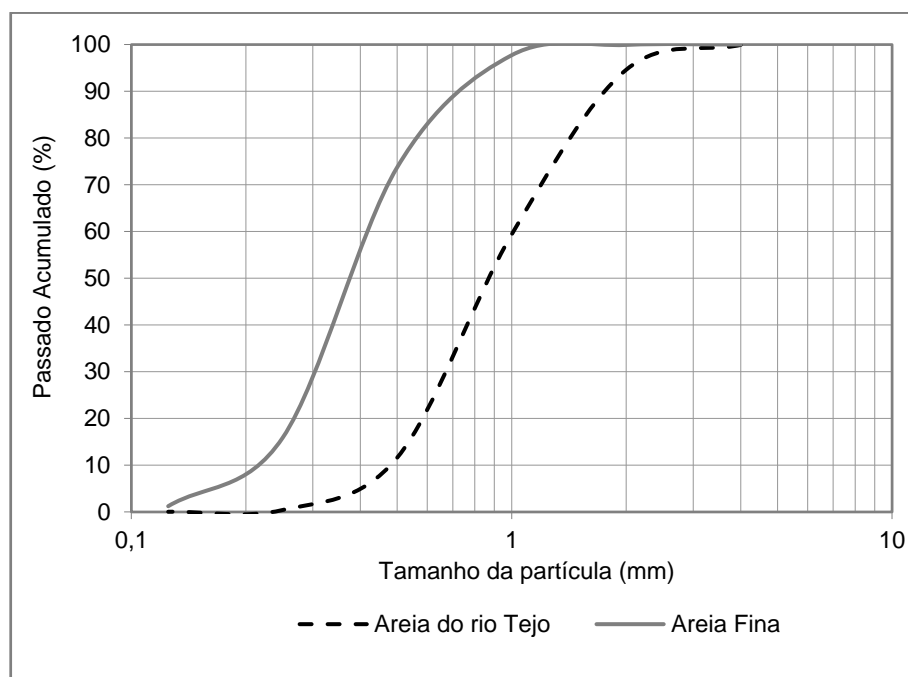


Figura 3.7 - Curva granulométrica das areias utilizadas

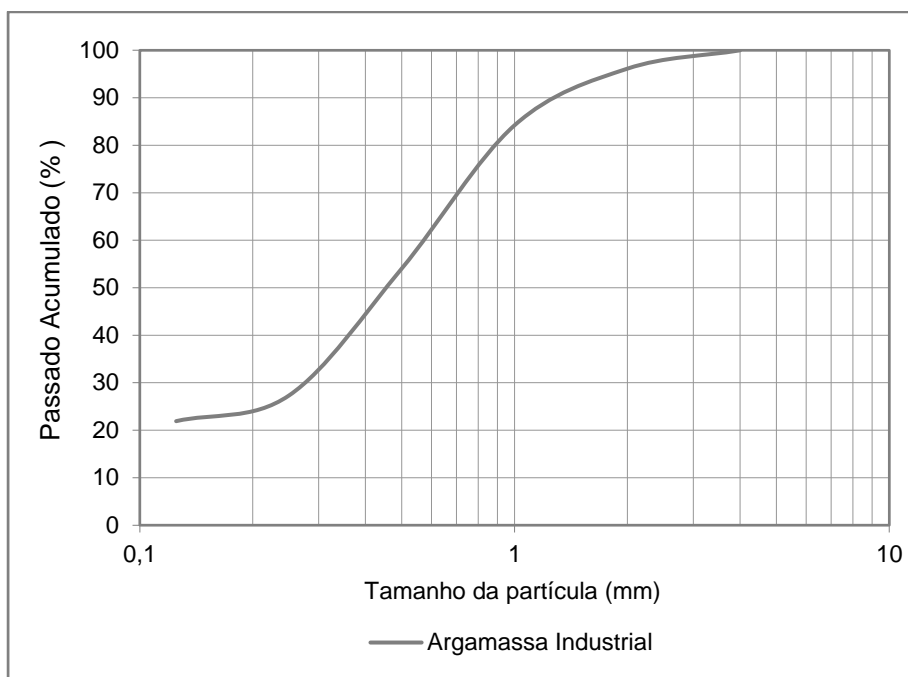


Figura 3.8 - Curva granulométrica do produto industrial

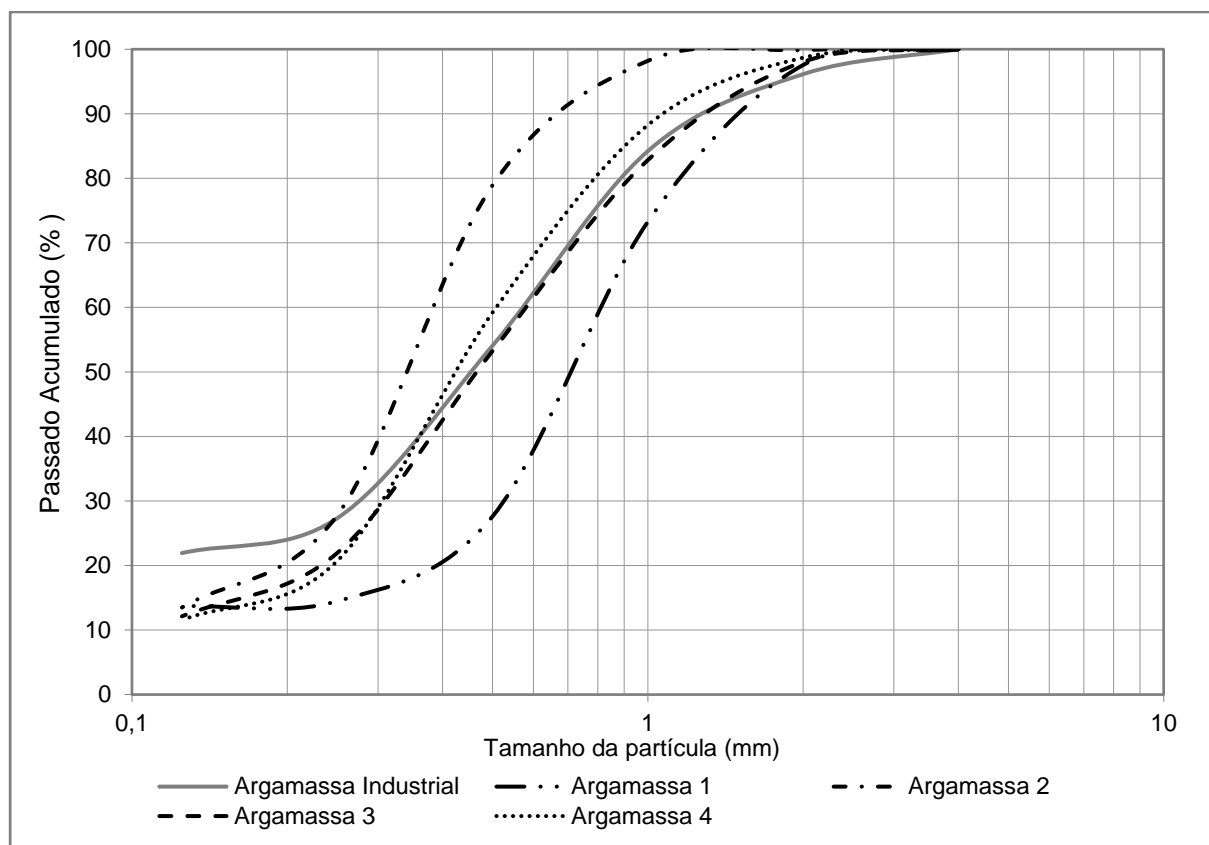


Figura 3.9 - Curva granulométrica do produto industrial e das misturas em seco

Quanto à argamassa em pó 3, argamassa que posteriormente foi selecionada para a produção dos provetes de argamassa tradicional, optou-se por estudar a granulometria dos traços 1:3, 1:2,5 e 1:2,2 para verificar qual o traço que melhor se ajusta à granulometria da argamassa industrial em pó, uma vez que a quantidade de material com dimensões inferiores a 0,125 mm era muito inferior ao da argamassa industrial em pó, definindo-se assim o traço com granulometria que mais se assemelha ao produto industrial.

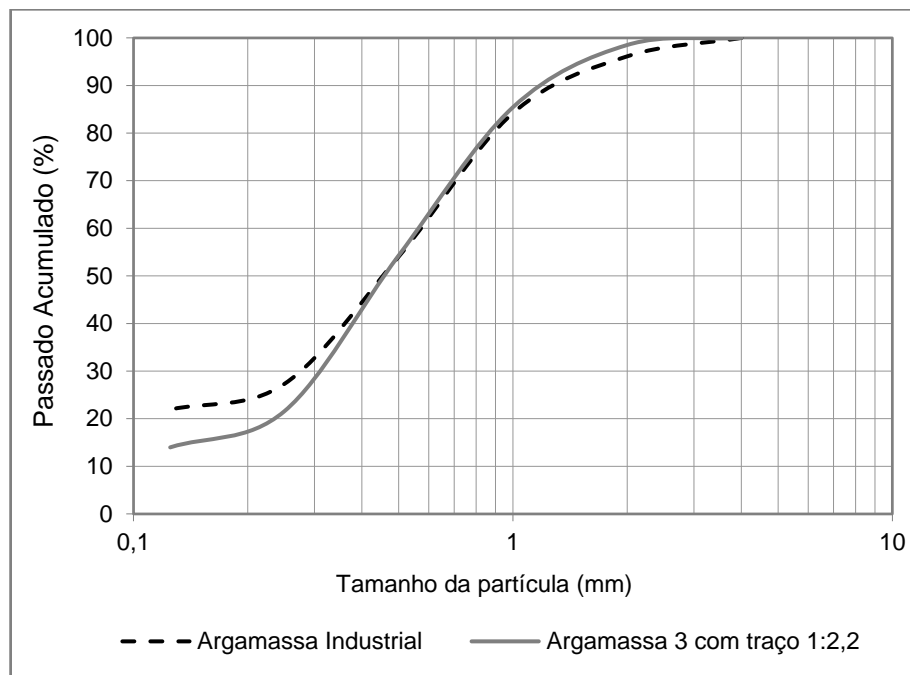


Figura 3.10 - Curva granulométrica da argamassa tradicional 3 com traço 1:2,2

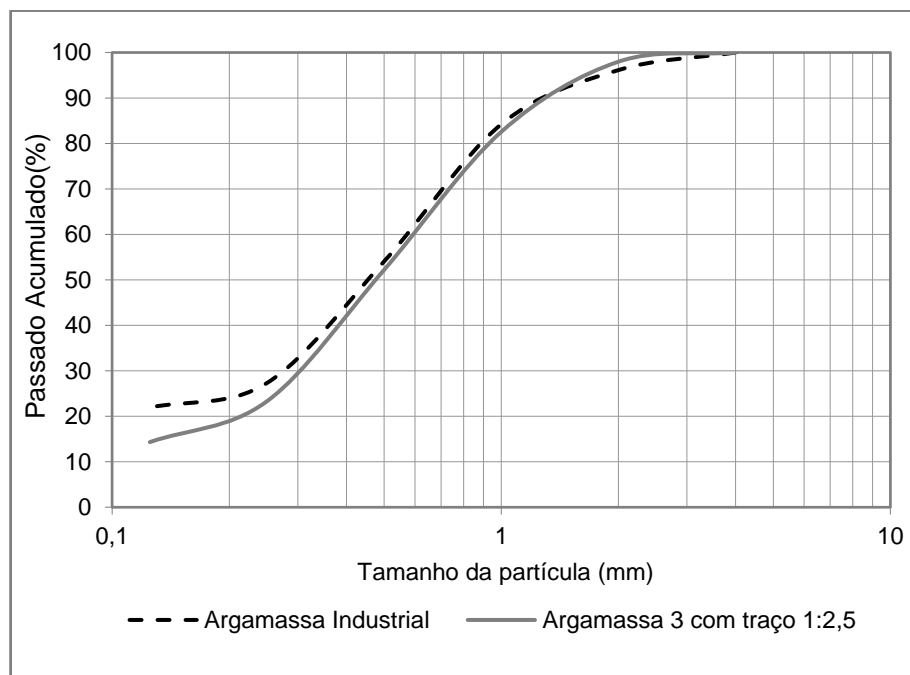


Figura 3.11 - Curva granulométrica da argamassa tradicional 3 com traço 1:2,5

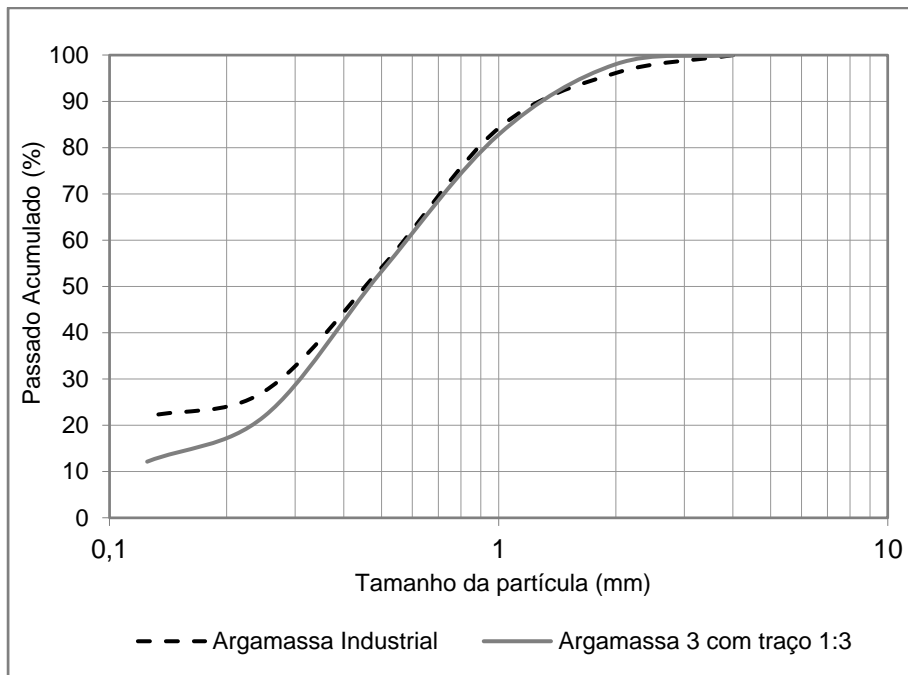


Figura 3.12 - Curva granulométrica da argamassa tradicional 3 com traço 1:3

3.2.1.2. Baridade

Segundo a NP EN 1097-3 a baridade é o quociente entre a massa do agregado seco preenchendo sem compactação um dado recipiente pela capacidade do recipiente.

Para a determinação da baridade da areia seca, secou-se previamente a areia em estufa à temperatura de 105 ± 5 °C e após arrefecimento foi misturada de modo a ficar o mais homogêneo possível.

Utilizou-se um recipiente com volume de 1 l e foi determinado o seu peso. Conhecidos a massa e o volume do recipiente encheu-se o recipiente como se pode ver na Figura 3.13 e Figura 3.14. A areia foi colocada até o copo encher o recipiente e verter areia para fora do mesmo. Findo este processo, nivelou-se a areia com uma régua niveladora e limpam-se os bordos do recipiente com um pincel, como se poder observar na Figura 3.15. Posteriormente pesou-se o recipiente com a areia. A baridade foi o resultado do quociente entre a diferença de pesos entre o recipiente cheio com areia e o recipiente vazio e o volume do recipiente.



Figura 3.13 - Recipiente para a determinação da baridade e areia



Figura 3.14 - Pá utilizada no enchimento do recipiente



Figura 3.15 - Nivelamento da areia com régua metálica



Figura 3.16 - Pesagem do recipiente com areia

O processo para a determinação da baridade da cal diferiu do processo da areia, o enchimento do recipiente de massa e volume conhecidos para a determinação da baridade da cal foi feito por um processo diferente. Encheu-se o recipiente através de funil com um sistema de fecho na extremidade, colocando o recipiente por baixo do funil. A cal foi colocada nesse funil e após encher-se o mesmo com a cal abriu-se o sistema de fecho permitindo à cal cair para o recipiente por ação da gravidade. O funil só foi fechado quando o recipiente já estava cheio e vertia cal para fora. Terminado este processo, o procedimento de nivelamento e pesagem do recipiente foi igual ao utilizado para determinar a baridade das areias.

Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 3.1.

Tabela 3.1- Resultados do ensaio da baridade

Tipo de material	Baridade (kg/m ³)
Baridade da areia fina (Rio Maior)	1570
Areia do rio Tejo	1450
Mistura das areias	1560
Cal Hidráulica Natural	630,3

3.2.2. PRODUTO EM PASTA

3.2.2.1. Água de amassadura, trabalhabilidade e espalhamento

A trabalhabilidade é a característica da argamassa, no estado fresco, que permite a sua boa aplicação, a capacidade de esta aderir ao suporte e a possibilidade de trabalho da superfície para lhe conferir o acabamento recomendado. Esta propriedade é determinante para o desempenho em serviço dos rebocos, pois, se por um lado permite e facilita a sua aplicação em obra, por outro condiciona o desempenho do reboco a outros níveis, designadamente no que diz respeito à retração e à impermeabilização, (Gonçalves e Margarido, 2012).

Argamassa industrial

A água de amassadura utilizada para a conceção dos provetes de argamassa industrial foi de 380 g para 2000 g de produto em pó. Estes valores são os recomendados pelo fabricante, que define que a

percentagem de água de amassadura para o produto deve ser de $19,5 \pm 1,0\%$. O aspeto da argamassa em pasta pode ser observado na Figura 3.17.

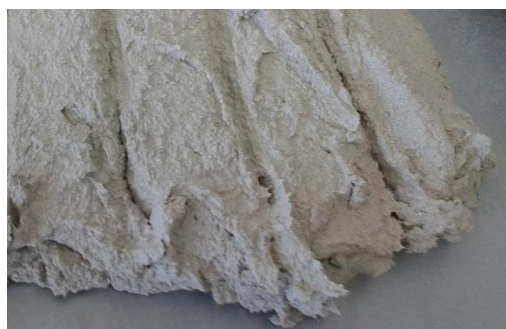


Figura 3.17 - Argamassa industrial em pasta

Argamassa tradicional

Cada tipo de cal hidráulica tem um teor em água e espalhamento próprios que maximizam a resistência com a trabalhabilidade adequada.

A trabalhabilidade de uma argamassa reboco deve ser avaliada de forma expedita e através do ensaio de espalhamento segundo a EN 1015-3. Para a avaliação expedita da argamassa foram considerados 2 aspetos:

- A argamassa deve escorregar rapidamente da colher de pedreiro quando esta se encontra na posição vertical
- Quando se roda a colher de pedreiro para a horizontal, de modo a que a argamassa permaneça sobre esta, a argamassa deve permanecer aderente.

Esta avaliação expedita é uma avaliação da trabalhabilidade feita manualmente que depende da sensibilidade de quem realiza o ensaio, sendo necessário um analista com experiência. Assim, para estimar a água necessária para as argamassas recorreu-se a um analista com experiência na área para avaliar a trabalhabilidade da mesma. À mistura de cal hidráulica natural e areia, foi adicionada cuidadosamente água até se obter a trabalhabilidade desejada.

Definida a quantidade inicial da água de amassadura realizou-se o ensaio de espalhamento para determinar com maior rigor a água de amassadura a utilizar nas argamassas, uma vez que este ensaio é o que caracteriza a trabalhabilidade das argamassas, segundo a EN 1015-3. Obtido o espalhamento desejado para a argamassa, entre 150 e 160 mm tendo por base as indicações do fabricante, ficou definida a quantidade de água a utilizar na argamassa.

A amassadura das argamassas foi realizada segundo o descrito na norma EN 1015-2 e como já descrito no ponto 3.1.5.

Para este ensaio foi utilizado um molde que se prolonga em forma de tremonha, uma mesa vibratória de espalhamento e um pilão, como se pode ver na Figura 3.18. O molde foi colocado sobre a mesa e foi lá preenchido com argamassa.



Figura 3.18 - Instrumentos utilizados no ensaio de espalhamento

A argamassa foi colocada no molde por 2 camadas onde cada uma delas foi compactada manualmente com 10 pancadas aplicadas através do pilão. Colocada a argamassa, nivelou-se com uma régua aos bordos do molde. O molde foi retirado e a mesa de impactos foi acionada de modo a conferir 15 pancadas. O espalhamento da argamassa foi medido com um paquímetro, como se pode ver na Figura 3.19.



Figura 3.19 - Utilização do paquímetro no ensaio de espalhamento

Nas amassaduras experimentais, para a Argamassa 1, quando se procedeu à mistura, foi necessário adicionar grandes quantidades de água para conferir trabalhabilidade a esta. Ao realizar o ensaio de espalhamento verificou-se uma elevada segregação por parte da argamassa e um reduzido espalhamento da mesma. A adição de água nesta mistura aumentou ainda mais a segregação. Foram elaborados provetes para avaliar a evolução da resistência no tempo, tendo como fatores de variação a água de amassadura utilizada na Argamassa 1.

Como se pode ver na Figura 3.20, há uma grande quantidade de agregados grossos na mistura da Argamassa 1, o que para uma argamassa de chapisco seria aconselhado e não para uma camada de revestimento de regularização, a trabalhabilidade é inadequada.



Figura 3.20 - Argamassa 1 em estado fresco

A Argamassa 2 possui boa trabalhabilidade, no entanto apresenta uma quantidade excessiva de finos, como se pode observar Figura 3.21. Para argamassa de acabamento, esta seria a mais indicada uma vez que permite um areado quase perfeito.



Figura 3.21 - Argamassa 2 em estado fresco

A Argamassa 3 possui boa trabalhabilidade e a quantidade de finos que permite conferir um alisamento da argamassa satisfatório para uma argamassa de regularização, como se pode ver na Figura 3.22.



Figura 3.22 - Argamassa 3 em estado fresco

A percentagem de água de amassadura recomendada pelo fabricante, para os traços de argamassas tradicionais de 1:3 de cal hidráulica e areia é de 15%. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Resultados obtidos nos ensaios

Tipo de Argamassa	Água de Amassadura (%)	Trabalhabilidade	Espalhamento (mm)
Industrial	19,0	Boa	153,1
Argamassa 1	15,9	Má	149,7
Argamassa 1 ⁽¹⁾	14,8	Má	116,9
Argamassa 2	15,5	Boa	148,1
Argamassa 3	15,0	Boa	151,1
Argamassa 4	15,4	Boa	146,6

⁽¹⁾ Variou-se a percentagem de água de amassadura relativamente à Argamassa 1.

3.2.2.2. Ar Contido

O ar contido de uma argamassa influencia a compacidade da argamassa de revestimento. Quanto menor é o teor de ar incorporado, mais compacta é a argamassa e maiores também a massa volúmica aparente, a resistência mecânica interna e o módulo de elasticidade, (Gonçalves e Margarido, 2012).

A determinação de ar contido foi segundo a norma EN 1015-7, onde para este trabalho experimental optou-se pelo Método da Pressão, que se aplica a argamassas com teor em ar declarado inferior a 20%.

O enchimento do recipiente, que se encontra na Figura 3.23, com a argamassa foi feito como consta na norma. Encheu-se o recipiente com argamassa, preparada de acordo com a norma EN 1015-2, em quatro camadas de espessura relativamente semelhante. Cada camada foi compactada manualmente, através de um pilão, aplicando 10 pancadas a cada uma. Com uma régua metálica foi retirado o excesso de argamassa para que a superfície fique plana e nivelada com o bordo do recipiente. Fixou-se a parte superior do aparelho de medição ao recipiente, fechou-se a válvula principal, abriram-se as válvulas laterais do aparelho de medição e introduziu-se água numa delas com o auxílio de uma garrafa de esguicho até sair água pela válvula oposta. Posteriormente bombeou-se ar até o ponteiro ficar a zero e abriu-se a válvula principal, determinando-se assim o ar contido na argamassa.



Figura 3.23 - Aparelho de medição de teor em ar para argamassas de acordo com EN 1015-7

Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Resultados obtidos no ensaio de ar contido

Tipo de Argamassa	Ar contido (%)
Industrial	17,0
Argamassa 1	17,0
Argamassa 1 ⁽¹⁾	12,0
Argamassa 2	7,4
Argamassa 3	8,4
Argamassa 4	7,4

⁽¹⁾ Variou-se a percentagem de água de amassadura relativamente à Argamassa 1.

3.2.2.3. Massa volúmica

O procedimento para a determinação da massa volúmica do produto em pasta foi segundo a EN 1015-6. Neste ensaio foi utilizado um recipiente cuja capacidade é de aproximadamente 1 l, o mesmo recipiente que é utilizado no aparelho de medição de ar contido, pelo método da pressão, segundo a norma EN 1015-7.

Para determinar a massa volúmica pesou-se o recipiente vazio na balança. Posteriormente procedeu-se ao enchimento do mesmo com a argamassa pelo mesmo método utilizado no ensaio de Ar Contido da norma EN 1015-7. O recipiente cheio com argamassa foi pesado na balança. A massa volúmica do produto em pasta é o resultado do quociente entre a diferença de pesos do recipiente cheio com argamassa e o recipiente vazio pelo volume do recipiente.

Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Resultados obtidos no ensaio de massa volúmica

Tipo de Argamassa	Massa Volúmica (kg/m ³)
Industrial	1762
Argamassa 1	1870
Argamassa 1 ⁽¹⁾	1934
Argamassa 2	2020
Argamassa 3	2018
Argamassa 4	2041

(1) Variou-se a percentagem de água de amassadura relativamente à Argamassa 1.

3.2.2.4. Tempo de vida útil

A determinação do tempo de vida útil de uma argamassa foi segundo a EN 1015-9, pelo método descrito no ponto 6.

Para este ensaio foi utilizado um copo circular com diâmetro interno não inferior a 75 mm e uma altura entre os 50 e 100 mm. A argamassa foi preparada como descrito no ponto 3.1.5. O recipiente foi preenchido com 10 camadas aproximadamente iguais, onde a cada uma delas foram aplicadas 4 pancadas levantando o recipiente e largando de forma a deixá-lo cair sobre um pano colocado numa bancada. Com uma régua metálica retirou-se o excesso de argamassa e nivelou-se com a superfície de forma a ficar plana.

As leituras são efetuadas colocando o recipiente com argamassa sobre uma balança, a tara do recipiente é retirada e é feito um furo na argamassa e consequentemente aplicada uma força como se pode ver na Figura 3.24, Figura 3.25 e Figura 3.26.

Como não se conhecia o tempo de vida útil das argamassas foram feitas duas leituras seguidas com um intervalo de 15 minutos. Como a variação da resistência não foi significativa optou-se por fazer leituras de hora a hora e consoante os resultados obtidos adaptar os intervalos de tempo uma vez que os furos provocados pelas leituras têm de ter, no mínimo, 20 mm de espaçamento entre eles para não influenciar

os valores medidos. Quanto maior o número de leituras feitas mais difícil se tornava encontrar um espaço para fazer a nova leitura.

Os provetes, entre leituras, permaneceram numa câmara de conservação à temperatura de $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ e à humidade relativa de $95 \pm 5\%$.

O tempo de vida útil da argamassa determinou-se quando foi obtida a resistência à penetração de $0,5\text{ N/mm}^2$, valor que corresponde a 1,5 kg quando se perfura a argamassa e esta se encontra sobre uma balança.

O aspeto dos provetes depois do ensaio pode ser observado na Figura 3.27 e os resultados obtidos encontram-se na Tabela 3.5.



Figura 3.24 - Equipamento para a determinação do tempo de vida útil e balança



Figura 3.25 - Instrumento que perfura a argamassa



Figura 3.26 - Medição da resistência à penetração



Figura 3.27 - Proвете de argamassa após ensaio

Tabela 3.5 - Resultados obtidos no ensaio de tempo de vida útil

Tipo de argamassa	Tempo de vida útil (min)
Industrial	1380
Tradicional	320

3.2.3. PRODUTO ENDURECIDO

3.2.3.1. Resistência mecânica

As argamassas em estudo são argamassas de renovação para rebocos. Estas argamassas pertencem à categoria CS II na gama de resistências à compressão segundo o Quadro 2 da NP EN 998-1 que corresponde a valores de 1,5 N/mm² a 5,0 N/mm² da gama de resistências à compressão após 28 dias.

Para a determinação das propriedades de resistência mecânica das argamassas utilizaram-se provetes prismáticos de 160 x 40 x 40 mm. O procedimento de amassadura da argamassa e o processo de betonagem adotado foi anteriormente descrito no ponto 3.1.5. O processo de cura dos provetes correspondeu ao descrito norma EN 1015-11 do ponto 7.3, para argamassas com outros ligantes hidráulicos: os provetes estiveram 48h (dois dias) no molde à temperatura de 20 ± 2 °C e à humidade relativa de $95 \pm 5\%$, 5 dias em água à temperatura de 20 ± 2 °C e 21 dias numa sala de provetes à temperatura de 20 ± 2 °C e humidade relativa de $65 \pm 5\%$.

Os provetes foram ensaiados à flexão e à compressão e testados aos 7, 28, 60 e 90 dias de idade.

Resistência à flexão

O equipamento utilizado é o descrito na norma EN 1015-11, onde para a flexão utilizou-se o equipamento que se encontra descrito no ponto 8.1 da respetiva norma e pode-se observar na Figura 3.28. A velocidade de carregamento respeita o descrito no ponto 8.2.2 da mesma norma, sendo este de 50 N/s.



Figura 3.28- Ensaio à flexão aos 28 dias de idade

Os resultados obtidos no ensaio de resistência à flexão encontram-se em anexo e na Figura 3.29 apresentam-se os valores médios.

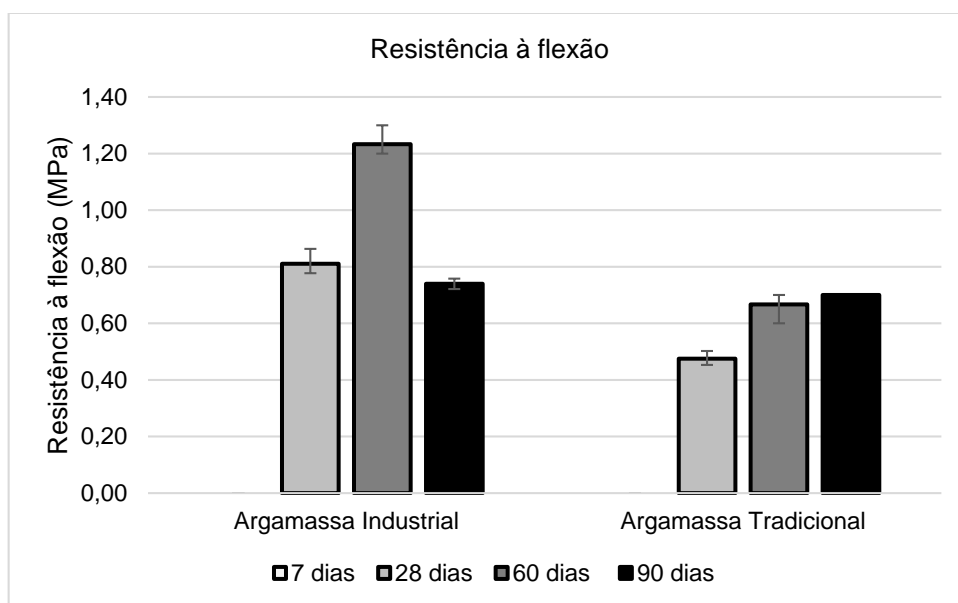


Figura 3.29 - Resultados obtidos no ensaio de resistência à flexão

Dos provetes sujeitos a este ensaio resultaram duas metades que foram reutilizadas para o ensaio de compressão, como se pode ver na Figura 3.30.

Resistência à compressão

Para o ensaio de resistência à compressão foram utilizadas velocidades de carregamento distintas nas argamassas. A argamassa industrial quando foi testada à compressão aos 28 dias, apenas foi possível testar a compressão utilizando a velocidade de carregamento de 200 N/s uma vez que a de 100 N/s, como descrito pela EN 1015-11 que recomenda que para argamassas da categoria CS II a velocidade de carregamento no ensaio de compressão deve ser de 100 N/s, não possibilitava a rotura do provete. Com a velocidade de carregamento de 100 N/s o equipamento detetava a rotura, no entanto, o provete em causa mostrava sinais evidentes em como não a tinha atingido. Não se observavam fissuras e o provete não apresentava fragilidades. Como tal, colocou-se o provete num equipamento de ensaio à compressão com a velocidade de carregamento de 200 N/s onde aí já foi atingida a rotura do provete e obtidos valores credíveis de resistência.

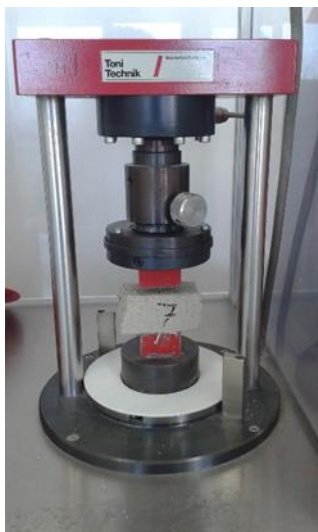


Figura 3.30 - Ensaio à compressão aos 7 dias de idade

Os resultados obtidos encontram-se em anexo e apresentam-se as médias na Figura 3.31.

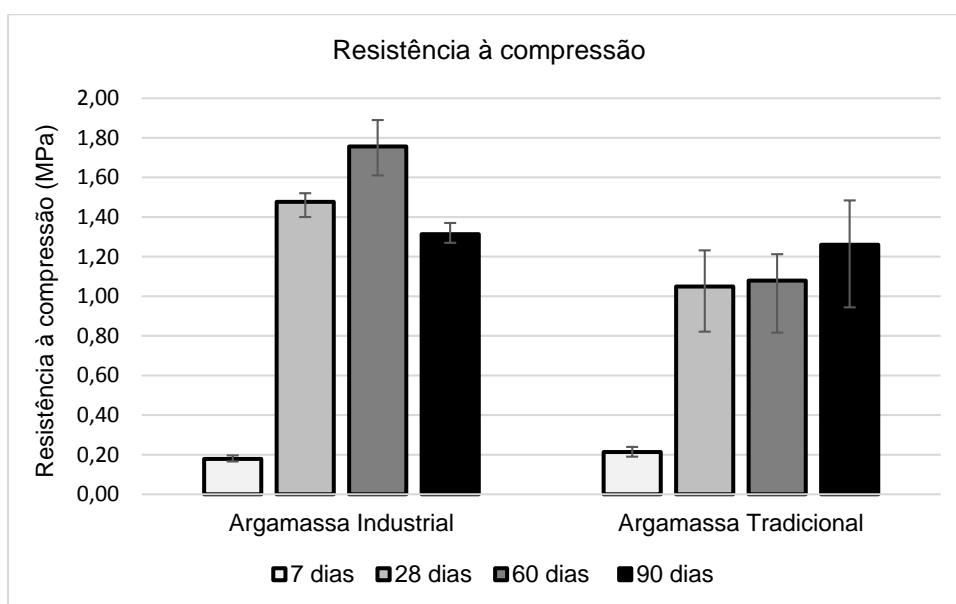


Figura 3.31 - Resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão

3.2.3.2. Massa volúmica do produto endurecido e condutibilidade térmica

A massa volúmica aparente no estado endurecido corresponde à relação entre a massa do material seco e o seu volume após 28 dias de cura. O volume pode ser medido através das dimensões geométricas dos provetes, segundo Cahier 2669-4 do CSTB, ou a partir da sua massa saturada e da sua pesagem hidrostática, como descrito na EN 1015-10, (Gonçalves e Margarido, 2012).

Os provetes utilizados neste ensaio estão de acordo com a norma EN 1501-11 ponto 7.1, com as dimensões de 160 x 40 x 40 mm.

A cura destes provetes foi segundo a norma EN 1015-11 tabela 1 do ponto 7.3 para argamassas com outros ligantes hidráulicos.

Após o período de cura, os provetes foram pesados e colocados numa estufa a 105 ± 5 °C durante cerca de 2 horas. Findo esse tempo retiraram-se os provetes da estufa e pesaram-se. Colocaram-se os provetes novamente na estufa e repetiu-se o processo, como descrito na EN 1015-10, ponto 7 e 8, até se obter uma variação de peso inferior a 0,2%. Atingido esse peso, fez-se o seu quociente pelo volume do provete que corresponde ao volume do molde, o valor de $256 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ como especificado no ponto 8 da EN 1015-10, determinando-se a massa volúmica do produto endurecido.

Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Resultados obtidos no ensaio de massa volúmica do produto endurecido

Tipo de Argamassa	Massa volúmica (kg/m^3)	Desvio padrão
Industrial	1459	13
Tradicional	1813	6

Com os resultados da massa volúmica, foi possível determinar a condutibilidade térmica das argamassas, com base no Quadro A.12 da NP EN 1745, que se encontra na Tabela 3.7, que especifica os valores da condutibilidade térmica, através da interpolação de valores.

Tabela 3.7 - Condutibilidade térmica para argamassas de alvenaria e argamassas de reboco (Quadro A.12, NP EN 1745)

Massa volúmica do material [kg/m^3]	$\lambda_{10,seco}$ [W/m.K]		Coeficiente de difusão do vapor de água μ	c [kJ/ kg .K]
	$P = 50 \%$	$P = 90 \%$		
250	0,074	0,080	5/20	1,0
400	0,10	0,11	5/20	1,0
700	0,18	0,20	5/20	1,0
1000	0,27	0,30	5/20	1,0
1500	0,47	0,54	5/20	1,0
1600	0,67	0,76	15/35	1,0
1800	0,83	0,93	15/35	1,0
2000	1,17	1,28	15/35	1,0
$f_{\psi} = 4 \text{ (m}^3/\text{m}^3\text{)}$				

Tabela 3.8 - Resultados obtidos para a condutibilidade térmica

Tipo de Argamassa	$P = 50\%$	$P = 90\%$
Industrial	0,45	0,52
Tradicional	0,85	0,95

Os valores de condutibilidade térmica, tabelados, segundo a NP EN 1745 são válidos para materiais cuja massa volúmica é controlada na produção mas para os quais não existem valores de condutibilidade térmica medidos diretamente. Estes fatores são dados como percentis (P) 50% e 90% do intervalo existente de valores de condutibilidade térmica para um certo material com uma dada massa volúmica. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 3.8.

3.2.3.3. Módulo de elasticidade do produto endurecido

A determinação deste parâmetro em argamassas não se encontra normalizada pelas Normas Europeias. Como tal, adaptaram-se as especificações da BS 1881-5 e da BS 1881-203, utilizadas na medição de ultrassons em betão, para determinar o tempo de propagação de ondas de ultrassons de argamassas endurecidas e posteriormente determinar o módulo de elasticidade através da seguinte expressão:

$$E_d = \left(\frac{c}{t} \right)^2 \cdot \frac{MV \cdot 0,01}{g} \cdot (1 + \nu) \cdot \frac{(1 - 2 \cdot \nu)}{(1 - \nu)} \quad (3.1)$$

Onde:

E_d – Módulo de elasticidade dinâmico (MPa)

t - Tempo médio de propagação (ms)

c - Comprimento do provete (mm)

$M.V.$ – Massa volúmica (Kg/m^3)

ν - Coeficiente de Poisson (sugerido 0,18 para as argamassas)

g - Aceleração da gravidade (m/s^2)

Os provetes utilizados neste ensaio são os utilizados na determinação da massa volúmica do produto endurecido, uma vez que para a sua realização os provetes têm de estar secos e tem de ser conhecida a sua massa volúmica para calcular o módulo de elasticidade.

A medição do tempo médio de propagação de uma onda foi feita através de um equipamento para a medição da velocidade de propagação de ultrassons, como se pode ver na Figura 3.32, Pundit Lab, no provete utilizado no ensaio da massa volúmica, como se pode ver na Figura 3.33.

O tempo de transmissão de onda de cada provete foi determinado colocando os transdutores do Pundit Lab nas faces laterais do provete como se pode ver na Figura 3.34. Antes de proceder à medição foi necessário calibrar o aparelho, como se pode ver na Figura 3.35.



Figura 3.32 - Equipamento para medição da velocidade de propagação de ultrassons



Figura 3.33 - Provete utilizados no ensaio da massa volúmica e posteriormente utilizados no ensaio do módulo de elasticidade



Figura 3.34 - Determinação do tempo de transmissão de onda do provete



Figura 3.35 - Calibração do pundit lab

Obtidos os resultados do tempo de transmissão de onda de cada provete, calculou-se o módulo de elasticidade. A média obtida encontra-se na Tabela 3.9.

Tabela 3.9 - Resultados obtidos no ensaio do módulo de elasticidade

Tipo de Argamassa	Módulo de Elasticidade (MPa)	Desvio padrão
Industrial	2063	173
Tradicional	3842	202

3.2.3.4. Aderência a diferentes suportes – bloco e tijolo

Para a realização do ensaio da aderência a diferentes suportes a argamassa foi amassada como descrito no ponto 3.1.5. Como o provete para o ensaio consiste na aplicação de argamassa com espessura de 10 ± 1 mm sobre o suporte, o processo de fabrico é diferente sendo a aplicação da argamassa nesse suporte realizado numa única camada e sem compactação. Após a aplicação da argamassa, aguardou-se até a mesma ter presa inicial e recortaram-se as áreas de teste no reboco com uma anilha cônica circular com diâmetro de 50 mm. A distância entre cada corte e as bordas do bloco foi de cerca 50 mm, como especificado na EN 1015-12.

Os suportes utilizados foram de tijolo cerâmico e de bloco de argamassa cimentícia, como mostram as Figura 3.36 e Figura 3.37.



Figura 3.36 - Suporte de tijolo cerâmico



Figura 3.37 - Suporte em bloco de argamassa cimentícia

O processo de cura destes provetes foi como consta na norma EN 1015-12, ponto 7.4. Os provetes, quando a argamassa já estava suficientemente endurecida, foram colocados numa câmara de cura à temperatura de 20 ± 2 °C e humidade relativa de $95 \pm 5\%$ durante 7 dias. Decorrido esse tempo os provetes foram colocados numa sala de conservação de provetes à temperatura de 20 ± 2 °C e humidade relativa de $65 \pm 5\%$ durante 21 dias. Como não foi possível realizar o ensaio de aderência quando os provetes completaram os 28 dias, estes foram colocados numa sala de ambiente controlado a 20 ± 2 °C e com uma humidade relativa de $50 \pm 5\%$ realizando-se o ensaio aos 32 dias de idade.

A realização do ensaio foi segundo o que está especificado na EN 1015-12 ponto 8. Nas zonas de teste colocou-se a cola e os discos, como se pode observar na Figura 3.38 e Figura 3.39, respetivamente. Os discos foram colados um dia antes do ensaio e o procedimento seguido de acordo com a norma. Para realizar o ensaio de aderência foi utilizado um equipamento de tração uniaxial, como se pode observar na Figura 3.40.



Figura 3.38 - Colocação de cola no provete



Figura 3.39 - Colocação dos discos no provete



Figura 3.40 - Equipamento de tração uniaxial vertical

A tensão de adesão individual foi determinada e foram identificados os tipos de rotura que ocorreram, como especificado na EN 1015-12, ponto 9.1:

- Tipo A – rotura entre a interface do reboco e do suporte. Rotura adesiva.
- Tipo B – rotura coesiva pelo reboco
- Tipo C – rotura coesiva pelo suporte.

Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 3.10 e na Tabela 3.11 e os provetes após ensaio na Figura 3.41, Figura 3.42, Figura 3.43 e Figura 3.44.

Tabela 3.10 - Resultados obtidos no ensaio de aderência ao bloco

Tipo de Argamassa	Tensão (MPa)	Tipo de rotura	Desvio padrão
Industrial	0,42	B	0,07
Tradicional	0,20	B	0,03



Figura 3.41 - Provete com argamassa industrial após ensaio de aderência ao bloco



Figura 3.42 - Provete com argamassa tradicional após ensaio de aderência ao bloco

Tabela 3.11 - Resultados obtidos no ensaio de aderência ao tijolo

Tipo de Argamassa	Tensão (MPa)	Tipo de rotura	Desvio padrão
Industrial	0,33	B	0,06
Tradicional	0,42	B	0,07



Figura 3.43 - Provete com argamassa industrial após ensaio de aderência ao tijolo



Figura 3.44 - Provete com argamassa tradicional após ensaio de aderência ao tijolo

3.2.3.5. Comportamento face à ação da água

Os parâmetros de desempenho para o comportamento de rebocos face à água, em especial rebocos exteriores, são a porosidade/porometria, capilaridade, permeabilidade à água líquida e permeabilidade ao vapor de água.

No presente trabalho apenas foram estudadas a porosidade aberta, capilaridade e permeabilidade ao vapor de água.

Capilaridade

A capilaridade é a propriedade que uma argamassa endurecida tem de absorver água, de forma natural, sem se exercer pressão, Gonçalves e Margarido (2012) citam EMOdico (2001), traduzida pela massa de água absorvida por área de material, devido a forças capilares.

O processo de amassadura da argamassa é o descrito no ponto 3.1.5. Os provetes utilizados neste ensaio possuem as dimensões 160 x 40 x 40 mm, tendo-se forrado a base do molde com papel de filtro respeitando as especificações do ponto 5.7 da EN 1015-18, como se pode ver na Figura 3.45. O processo de fabrico foi o descrito no ponto 3.1.5, como estabelecido pela EN 1015-11. Por fim, colocou-se outra folha de papel de filtro por cima do molde, como especificado na EN 1015-18, e como se pode ver na Figura 3.46.

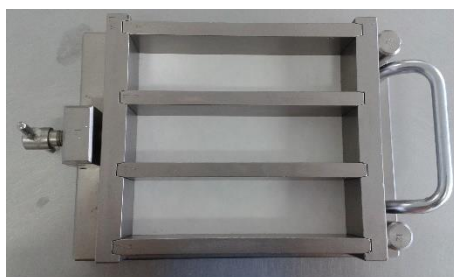


Figura 3.45 - Molde com papel de filtro na base para o ensaio de capilaridade

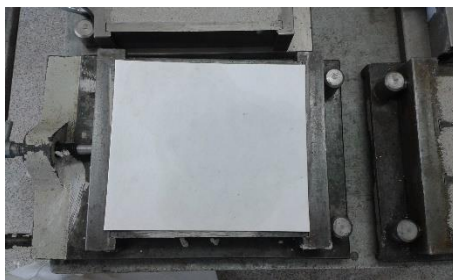


Figura 3.46 - Molde com papel de filtro para o Ensaio de Capilaridade

Os parâmetros determinados neste ensaio foram obtidos segundo o que está estabelecido na EN 1015-18.

O processo de cura dos provetes utilizado foi o que se encontra descrito na EN 1015-18, ponto 7.4 para argamassas com outros ligantes hidráulicos. Os provetes permaneceram 2 dias no molde numa câmara de conservação a 20 ± 2 °C e à humidade relativa de $95 \pm 5\%$, 5 dias imersos em água a 20 ± 2 °C e 21 dias numa sala de provetes à temperatura de 20 ± 2 °C e a humidade relativa de $65 \pm 5\%$, condições do próprio laboratório. No entanto, como os provetes completaram os seus 28 dias numa sexta-feira e não era possível ter acesso ao laboratório no dia seguinte, optou-se por deixar estar os provetes na sala de provetes por 24 dias, em vez de 21 dias, e iniciar-se o ensaio na segunda-feira.

Os provetes foram partidos ao meio através de um equipamento de flexão e selados com parafina em estado líquido, aquecida em banho-maria, nas quatro faces laterais, como esquematizado na Figura 3.47. Os provetes foram colocados, com as faces partidas viradas para baixo sob um suporte, num tabuleiro com um furo num dos lados para permitir que os provetes permaneçam em água com profundidade de 5 a 10 mm, como mostram a Figura 3.48 e Figura 3.49, evitando a aderência de bolhas de ar, como esquematizado na Figura 3.50.



Figura 3.47 - Representação esquemática das faces onde se coloca parafina (faces preenchidas)



Figura 3.48 - Suportes dos provetes do Ensaio de Capilaridade



Figura 3.49 - Provete no decorrer do ensaio de capilaridade

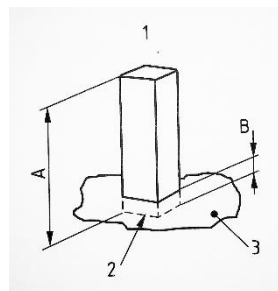


Figura 3.50 - Provete de argamassa (Figura 1 da EN 1015-18)

Para a generalidade das argamassas os provetes devem ser pesados aos 10 minutos, 90 minutos e 24 horas, com exceção das argamassas de renovação, isto é, as argamassas em estudo, onde apenas é necessário efetuar as pesagens após 24 horas. Contudo, realizaram-se as pesagens aos 10 minutos, 90 minutos e 24 horas, obtendo-se dados para realizar um gráfico de absorção de água ao longo do tempo e comparar os resultados obtidos com o betão.

Completadas as 24 horas e pesados os provetes, estes foram partidos ao meio com uma espátula segundo a direção de ascensão de água para observar a profundidade da penetração de água, como especificado na EN 1015-18.



Figura 3.51 - Provete de argamassa industrial partido após ensaio de capilaridade



Figura 3.52 - Medição da profundidade de penetração de água nos provetes de argamassa industrial



Figura 3.53 - Provete de argamassa tradicional partido após ensaio de capilaridade

O coeficiente de capilaridade para argamassas de renovação é expresso em kg/m^2 após 24h de estarem colocadas com uma face em contacto com uma lâmina líquida, aos 28 dias de idade, e é calculado de acordo com o ponto 9 da EN 1015-18.

Neste ensaio não foi possível medir a profundidade de penetração da água, tanto na argamassa industrial como na argamassa tradicional, como se pode verificar na Figura 3.51, Figura 3.52 e Figura 3.53, e explicado em seguida.

Nos provetes de argamassa industrial a ascensão capilar deu-se apenas pela face selada dos provetes, não sendo possível medir a profundidade de penetração de água. Quanto aos provetes de argamassa tradicional não foi medida a profundidade de penetração da água pois a absorção de água foi total.

Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 3.12.

Tabela 3.12 - Resultados obtidos no ensaio de capilaridade

Tipo de Argamassa	Índice de capilaridade ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$)	Absorção de água por capilaridade (kg/m^2)
Industrial	0,10	2,00
Tradicional	1,40	(1)

⁽¹⁾ Verificou-se absorção total

Com base na EN 1015-18, o índice de capilaridade é calculado através da diferença de peso entre o provete após 90 minutos e após 10 minutos de contacto com água, multiplicada por 0,1, como especificado no ponto 9 da norma.

A absorção de água por capilaridade, segundo a norma, é a diferença de peso entre o provete 24 horas após e 10 minutos após contacto com água, multiplicada por 0,625.

Para avaliar a evolução de peso em água ao longo do ensaio foi realizado um gráfico, como se pode ver na Figura 3.54.

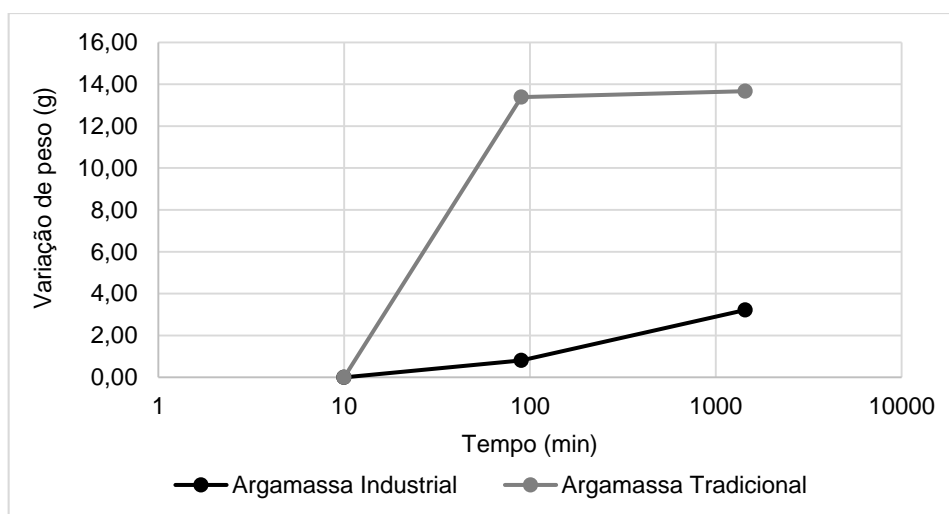


Figura 3.54 - Variação de peso ao longo do ensaio de capilaridade

Coeficiente de permeabilidade ao vapor

O grau de permeabilidade ao vapor a exigir ao reboco deve ser tanto maior quanto maior for a sua permeabilidade à água, para que a facilidade com que esta é libertada seja proporcional à quantidade de água que atravessou o revestimento, Gonçalves e Margarido (2012) citam Laboratório Nacional de Engenharia (1996).

A permeabilidade ao vapor é o fluxo de vapor de água que atravessa a argamassa, em condições de equilíbrio, por unidade de superfície e pressão de vapor, Gonçalves e Margarido (2012) citam EMOdico (2001). Este parâmetro pode ser medido tendo em conta condições constantes de temperatura, diferenças de vapor entre ambientes com diferentes humidades relativas do ar, área da superfície e espessura do material, (Gonçalves e Margarido, 2012).

A permeabilidade pode ser medida, segundo o coeficiente de resistência à difusão do vapor de água, que é um valor característico dos materiais, obtido pela relação adimensional entre a permeabilidade ao vapor de água do ar e a permeabilidade ao vapor de água do próprio material, que indica quantas vezes a resistência à difusão de um provete desse material é maior do que a de uma camada de ar em repouso de igual espessura e sujeita às mesmas condições ambientais, Gonçalves e Margarido (2012) citam Freitas e Pinto (1998).

A argamassa para este ensaio foi preparada como descrito no ponto 3.1.5.

Neste ensaio seguiu-se o procedimento descrito na EN 1015-19. A preparação e armazenamento dos provetes foi consoante o descrito no ponto 6.2 da norma. Neste ensaio foi utilizado um suporte de betão celular autoclavado, como se pode observar na Figura 3.55, com massa volúmica de $550 \pm 50 \text{ kg/m}^3$ e coberto com duas camadas de gaze antes de aplicar a argamassa.



Figura 3.55 - Suporte de betão celular autoclavado

Sobre a gaze foram colocados anéis metálicos, como mostra a Figura 3.56, com um diâmetro pouco maior que o copo de ensaio, que se encontra na Figura 3.59. O processo de fabrico destes provetes consistiu em colocar argamassa para que o anel metálico ficasse completamente preenchido, como se pode ver na Figura 3.57.



Figura 3.56 - Anéis metálicos sobre a gaze no betão celular autoclavado



Figura 3.57 - Colocação da argamassa para a produção dos provetes

A cura dos provetes foi realizada como consta no Quadro 1 do ponto 6.2 da norma EN 1015-19 para argamassas com outros ligantes hidráulicos.

Após os 28 dias, a espessura dos provetes foi medida em três pontos distintos e foi calculado o valor médio, como se pode ver na Figura 3.58.



Figura 3.58 - Medição da espessura do provete de permeabilidade ao vapor de água

O procedimento adotado foi o descrito no ponto 7 da norma. Colocou-se uma solução saturada de KNO_3 no copo de ensaio, como se pode ver na Figura 3.60, deixando um espaço de ar de $10 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$ entre o provete e a superfície da solução. Os provetes foram selados aos respectivos moldes com um material vedante, silicone, e foram colocados na sala de conservação, com as condições descritas no Quadro 1 da norma.



Figura 3.59 - Copo de ensaio de permeabilidade ao vapor de água



Figura 3.60 - Copo de ensaio com o provete

Para que o produto de selagem secasse aguardaram-se 2 dias e iniciaram-se as pesagens quando esse tempo terminou. Em cada pesagem, foram medidas a temperatura e a humidade relativa da sala de provetes para determinar as condições de ensaio.

Os copos de ensaio foram mantidos na sala de conservação de provetes. Estes foram pesados com intervalos de tempo constantes e elaborou-se um gráfico, para cada tipo de argamassa, com a relação entre a massa do copo e o tempo como se pode ver na Figura 3.61 e Figura 3.62. Este ensaio terminou quando se conseguiu colocar no gráfico três pontos numa linha reta o que indica que as condições eram estáveis, a quantidade de vapor de água a passar pelo provete por unidade de tempo é constante, como refere a norma no ponto 7.

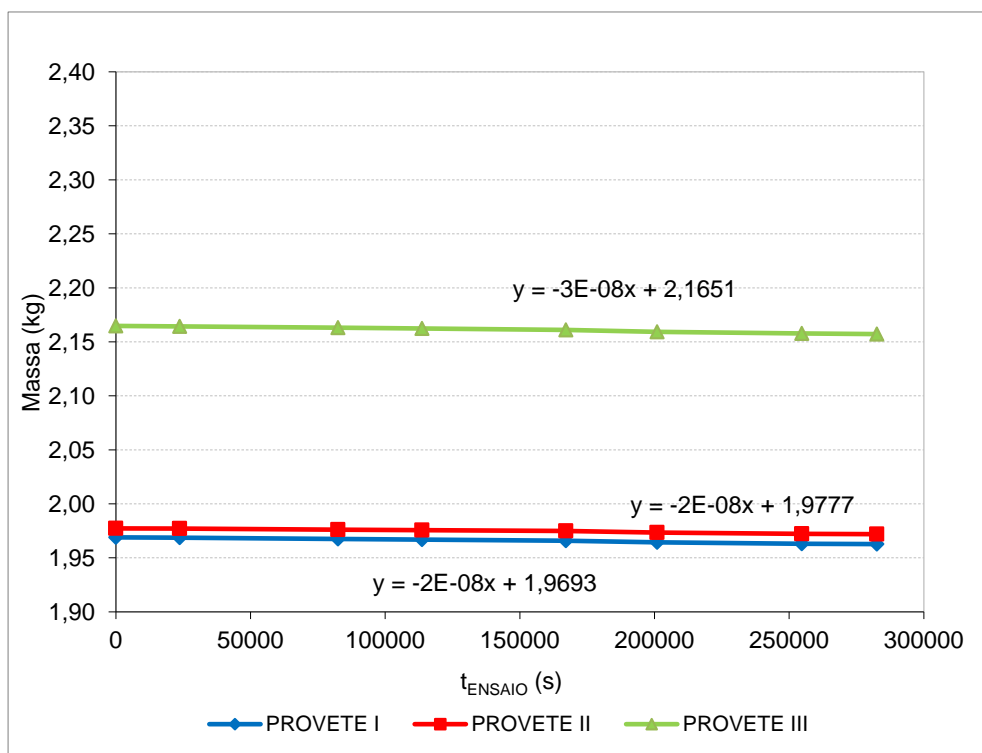


Figura 3.61 - Gráfico do ensaio de permeabilidade ao vapor da argamassa industrial

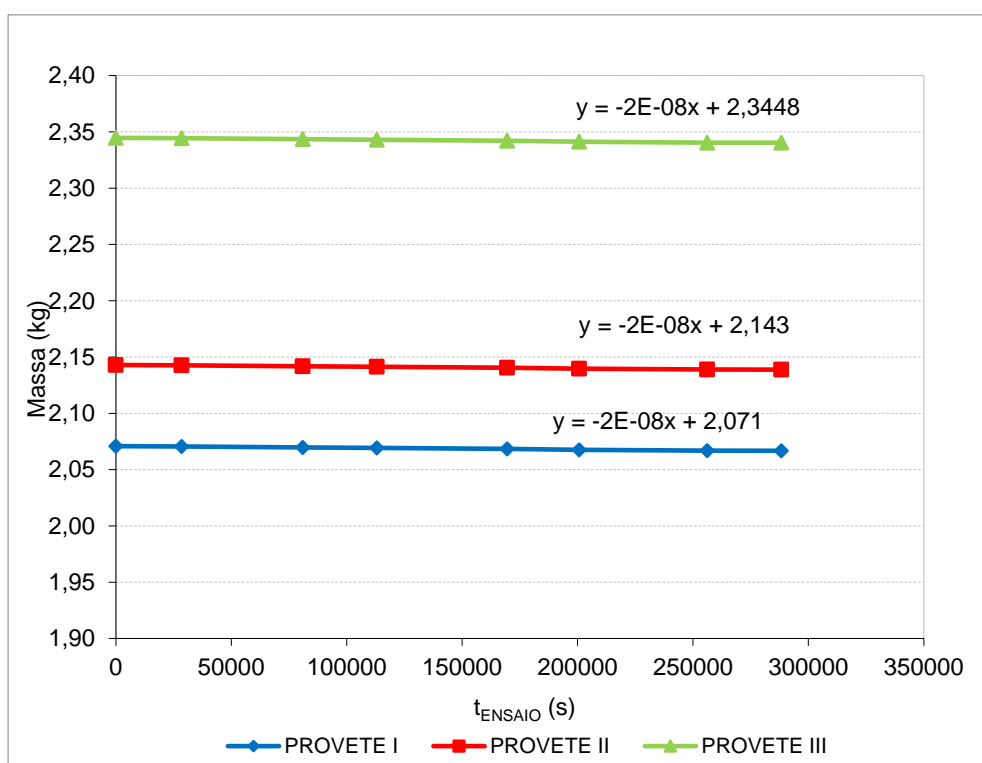


Figura 3.62 - Gráfico do ensaio de permeabilidade ao vapor da argamassa tradicional

Com o gráfico, determinou-se o fluxo de vapor de água, através do seu declive, $\Delta G/\Delta$, e calculou-se a permeância ao vapor de água, Λ em $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$, a partir da seguinte fórmula:

$$\Lambda = \frac{1}{A \cdot \Delta p / \Delta t - R_A} \quad (3.2)$$

Posteriormente calculou-se a permeância média ao vapor de água a partir dos resultados obtidos individualmente em cada provete. A permeabilidade ao vapor de água, W_p , foi determinada a partir do valor médio para a permeância ao vapor de água multiplicado pela espessura média dos provetes em metros. Esta metodologia de cálculo foi segundo o especificado no ponto 8 da norma, os resultados obtidos no ensaio encontram-se na Tabela 3.13.

O cálculo do coeficiente da permeabilidade ao vapor de água foi através da seguinte expressão:

$$\mu = \frac{1,94 \cdot 10^{-10}}{W_p} \quad (3.3)$$

Onde:

$1,94 \cdot 10^{-10}$ é o equivalente ar do fator de permeabilidade ao vapor de água para uma temperatura de 20 °C e uma pressão atmosférica de 101325 Pa

W_p é a permeabilidade ao vapor de água.

Este cálculo teve por base o especificado no Quadro 2, alínea b) da NP EN 998-1.

Tabela 3.13 - Resultados do ensaio de permeabilidade ao vapor de água

Tipo de Argamassa	λ (Kg/Pa · m ² · s)	W_p (Kg/Pa · m · s)	μ
Industrial	2,16E-09	4,40E-11	4,58
Tradicional	1,73E-09	3,50E-11	5,97

Porosidade acessível à água

Para o ensaio da determinação da porosidade acessível à água das argamassas em estudo foram fabricados provetes com formato cilíndrico e dimensões de 46 mm de diâmetro e 31 mm de altura. O seu processo de fabrico consistiu na colocação de duas camadas de argamassa onde cada camada foi compactada manualmente com um pilão de madeira, com 10 pancadas. O molde utilizado é o que se encontra na Figura 3.63.



Figura 3.63 - Molde utilizado na fabricação dos provetes

O processo de cura dos provetes foi de 2 dias no molde numa câmara a 20 ± 2 °C e com humidade relativa de $95 \pm 5\%$. Posteriormente os provetes foram colocados em água durante 5 dias à temperatura de 20 ± 2 °C, terminado esse tempo foram colocados na sala de cimentos com temperatura e humidade relativa de 20 ± 2 °C e $65 \pm 5\%$, respetivamente, durante 21 dias completando assim o seu processo de cura.

Após esse período os provetes foram colocados em vácuo, durante 3 horas, à pressão de 50 mbar (5 KPa), pressão regulada para provetes de betão. Pretendia-se aplicar pressão mais baixa aos provetes uma vez que os provetes de argamassa de cal são frágeis, mas não foi possível uma vez que o sistema não permitiu a regulação da pressão.

Para a etapa seguinte do ensaio foi feita uma solução saturada de hidróxido de cálcio em água destilada. Com a bomba de vácuo ainda em funcionamento foi colocada a solução saturada em hidróxido de cálcio para saturar os provetes, durante 1 hora. Terminado esse tempo, a bomba de vácuo foi desligada e os provetes foram mantidos debaixo da solução por um período de cerca 18 horas.

Após este processo foi determinada a massa hidrostática, através da pesagem dos provetes dentro de água como se pode ver na Figura 3.65, e a sua massa sem estar dentro de água, onde previamente se enxugou a superfície do provete, como se pode ver na Figura 3.66. O equipamento utilizado encontra-se na Figura 3.64.



Figura 3.64 - Equipamento utilizado nas pesagens dos provetes



Figura 3.65 - Pesagem hidrostática



Figura 3.66 - Pesagem do provete

Por fim, os provetes foram colocados numa estufa a 105 ± 5 °C até atingirem massa constante, considerando-se que os provetes estavam secos quando a variação de massa entre pesagens sucessivas, num intervalo de 24 horas, era inferior a 0,05%.

A percentagem de volume de poros acessível à água, ε , foi determinada pela seguinte expressão:

$$\varepsilon(\%) = \frac{M_{ar} - M_{seco}}{V} = \frac{M_{ar} - M_{seco}}{M_{ar} - M_{\text{água}}} \cdot \rho_{\text{água}} \cdot 100 \quad (3.4)$$

Onde:

M_{ar} é a massa do provete saturado;

M_{seco} é a massa do provete seco;

$M_{\text{água}}$ é a massa hidrostática do provete saturado, em gramas (g);

$\rho_{\text{água}}$ é a massa volúmica da água à temperatura do ensaio em gramas por milímetro cúbico, (g/mm³).

Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 3.14.

Tabela 3.14 - Resultados obtidos no ensaio de porosidade acessível à água

Tipo de Argamassa	ε médio(%)	Desvio padrão
Industrial	34,36	1,20
Tradicional	29,21	0,49

3.2.3.6. Características após ciclos de gelo/degelo

A resistência de uma argamassa aos ciclos de gelo/degelo depende da sua capacidade para resistir à penetração de água, perder a água rapidamente prevenindo a saturação e ainda de uma estrutura porosa que permita resistir à tensão provocada pelo aumento de volume da água quando solidifica, (Santos, Frade e Pereira, 2014).

O procedimento dos ciclos de gelo/degelo adotado foi o que consta na norma EN 1348, pois com base nas referências da Eng^a. Dina Frade os ciclos que constam na norma NP EN 12371, para pedra natural, são muito agressivos para os provetes de argamassa de cal, talvez devido ao facto de a pedra ser um material menos poroso que as argamassas de cal e mais resistente. Quanto aos ciclos de gelo/degelo aplicados ao betão verifica-se que são muito agressivos para os provetes de argamassa de cal. A prCEN/TR 15177:2005 especifica o ensaio de gelo/degelo a aplicar em provetes de betão para avaliar dos danos internos dos mesmos após ciclos de gelo/degelo. Os provetes sujeitos a ensaio são vigas com as dimensões de 400 mm x 100 mm x 100 mm e o número de ciclos recomendado de 56. Com as estas dimensões, os provetes seriam difíceis de fabricar com argamassas de cal uma vez que como têm altura muito elevada, o seu processo de cura iria ser dificultado devido à necessidade de contacto com dióxido de carbono para o processo de cura. Quanto aos ciclos descritos na norma dos cimentos cola, estes permitem simular com maior fiabilidade o que acontece na realidade às argamassas de cal hidráulica, não as degradando de forma excessiva.

Os ciclos de gelo/degelo iniciaram-se com a colocação dos provetes, após o processo de cura, numa câmara à temperatura, como mostra a Figura 3.67, de -15 ± 3 °C durante $2 \text{ h} \pm 20 \text{ min}$. Decorrido este tempo, os provetes foram colocados num recipiente com água a 20 ± 3 °C e o recipiente colocado numa câmara a 15 ± 3 °C, como mostra a Figura 3.68, durante pelo menos 2 horas com o objetivo de saturar

os provetes, estando assim completo o primeiro ciclo de gelo/degelo. Posteriormente, cada ciclo de gelo/degelo consistiu em colocar os provetes saturados na câmara de congelação à temperatura de $-15 \pm 3^{\circ}\text{C}$ durante $2 \text{ h} \pm 20 \text{ min}$. Decorrido esse tempo, voltou-se a colocar os provetes no recipiente com água a $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$ e colocou-se o conjunto na câmara à temperatura de $15 \pm 3^{\circ}\text{C}$, durante pelo menos 2 horas, para voltar a saturar os provetes e dar início a um novo ciclo. Para controlar a temperatura da câmara de congelação, em cada ciclo de gelo, foi colocado um termómetro para verificar a temperatura no seu interior após a colocação dos provetes.



Figura 3.67 - Câmara utilizada na congelação dos provetes e termómetro para medir a temperatura do interior da mesma



Figura 3.68 - Recipientes com água e com os provetes no interior da câmara de ambiente controlado

Quanto ao processo de cura dos provetes, fez-se algumas alterações no que está especificado na EN 1348. Como o processo de cura é adaptado a cimentos cola, para as argamassas em estudo adotou-se o processo de cura especificado na norma EN 1015-11, ponto 7.3, para argamassas com ligantes hidráulicos.

Após os ciclos os provetes foram sujeitos a ensaios de massa volúmica do produto endurecido, módulo de elasticidade, resistências mecânicas e ainda aderência ao suporte de tijolo e os resultados obtidos encontram-se na Tabela 3.15, Tabela 3.16, Tabela 3.17, Tabela 3.18 e Tabela 3.19, respetivamente.

Para o ensaio de aderência ao tijolo, o processo de cura de argamassa foi o descrito no ponto 3.2.3.2 para que as condições dos provetes fossem as mesmas e fosse possível uma conclusão mais precisa sobre a influência dos ensaios de gelo/degelo a que se submeteram os provetes.

Para os ensaios de massa volúmica do produto endurecido, módulo de elasticidade e resistências mecânicas, a argamassa tradicional foi avaliada após 2 e 5 ciclos pois não resistiram a mais ciclos. Quanto aos provetes de argamassa industrial, esta argamassa foi avaliada após 2, 5, 7 e 11 ciclos.

Os provetes 40 x 40 x 160 mm de argamassa tradicional, na transição do 3º para o 4º ciclo, mostraram sinais de degradação. Ao retirar os provetes da água, um deles partiu-se, como se pode ver na Figura 3.70, e os restantes mostraram algumas fissuras como se pode observar na Figura 3.69. O interior do provete partido, como mostra a Figura 3.71, apresenta irregularidades e vazios que evidenciam os sinais de cristalização e recristalização que acabaram por fissurar o provete, fazendo com que o mesmo se partisse quando retirado da água. Pelo contrário, os provetes de argamassa industrial não apresentam degradação visível. Na transição do 4º para o 5º ciclo deu-se a destruição total dos provetes 40 x 40 x 160 mm de argamassa tradicional, como se pode ver na Figura 3.73, terminando-se assim os ciclos para os provetes de argamassa tradicional. Os provetes de argamassa industrial não sofreram danos visíveis como se pode ver na Figura 3.72. A argamassa aplicada nos tijolos para a avaliação da aderência continuou intacta, tanto a da argamassa tradicional como a da argamassa industrial, como se pode ver na Figura 3.74.



Figura 3.69 - Provede de argamassa tradicional fissurado ao fim de 3 ciclos

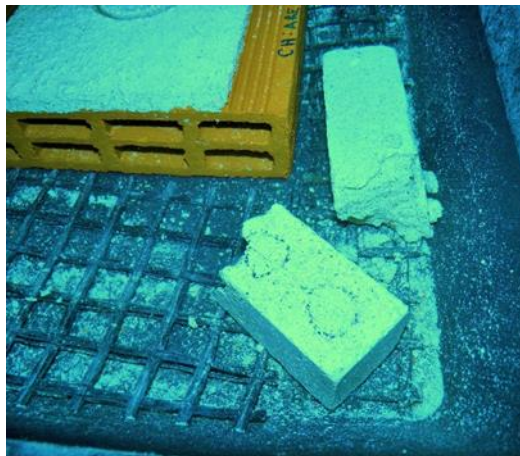


Figura 3.70 - Provede de argamassa tradicional partido dentro de água



Figura 3.71 - Interior do provete partido de argamassa tradicional após 3 ciclos de gelo/degelo



Figura 3.72 - Provete de argamassa industrial (à esquerda) e provetes de argamassa tradicional (à direita) após 4 ciclos de gelo/degelo



Figura 3.73 – Provete de argamassa industrial (à esquerda) e provetes de argamassa tradicional (à direita) após 5 ciclos de gelo/degelo



Figura 3.74 - Provete para o ensaio de aderência após 5 ciclos de gelo/degelo

Massa volúmica

O método adotado para determinar a massa volúmica do produto endurecido foi o descrito no ponto 3.2.3.2. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 3.15.

Tabela 3.15 – Resultados obtidos para a massa volúmica após ciclos de gelo/degelo

Tipo de argamassa	Número de ciclos	Massa volúmica (kg/m ³)	Desvio padrão
Industrial	2	1283	4
	5	1389	42
	7	1415	15
	11	1396	62
Tradicional	2	1717	16

Módulo de elasticidade

O método adotado para determinar a massa volúmica do produto endurecido foi o descrito no ponto 3.2.3.3. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 3.16.

Tabela 3.16 - Resultados obtidos para o módulo de elasticidade após ciclos de gelo/degelo

Tipo de Argamassa	Número de ciclos	Módulo de Elasticidade (MPa)	Desvio padrão
Industrial	2	1729	121
	5	2567	215
	7	2765	107
	11	2259	184
Tradicional	2	3325	523

Resistências mecânicas

A determinação das resistências mecânicas foi através da metodologia descrita no ponto 3.2.3.1. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 3.17.

Resistência à flexão

Tabela 3.17 – Resultados obtidos para resistência à flexão em MPa após ciclos de gelo/degelo

Número de ciclos	Argamassa Industrial	Desvio padrão	Argamassa Tradicional	Desvio padrão
2	0,30	0,01	0,00	0,00
5	0,57	0,06	(1)	-
7	0,58	0,02	(1)	-
11	0,55	0,00	(1)	-

(1) Não foi realizado o ensaio de flexão pois os provetes degradaram-se ao fim de 5 ciclos.

Resistência à compressão

Apesar de os provetes de argamassa tradicional, ao fim de 5 ciclos de gelo/degelo, apresentarem elevada degradação foi possível ensaiá-los à compressão, como se pode ver na Figura 3.75.

Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 3.18.

Tabela 3.18 – Resultados obtidos para resistência à compressão em MPa após ciclos de gelo/degelo

Número de ciclos	Argamassa Industrial	Desvio padrão	Argamassa Tradicional	Desvio padrão
2	0,46	0,03	0,57	0,06
5	0,80	0,05	0,59	0,09
7	0,78	0,02	(1)	-
11	0,78	0,10	(1)	-

(1) Não foi realizado o ensaio de compressão pois os provetes degradaram-se ao fim de 5 ciclos.



Figura 3.75 - Ensaio de compressão a argamassa tradicional após 5 ciclos de gelo/degelo

Aderência ao tijolo

A metodologia utilizada na determinação da tensão de aderência foi a que se encontra descrita no ponto 3.2.3.4. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 3.19 e os provetes após ensaio encontram-se na Figura 3.76.

Tabela 3.19 - Resultados obtidos no ensaio de aderência após 5 ciclos de gelo/degelo

Tipo de Argamassa	Tensão (MPa)	Tipo de rotura	Desvio padrão
Industrial	0,48	B	0,03
Tradicional	0,60	A,B	0,14



Figura 3.76 - Provetes após ensaio de aderência sujeitos a 5 ciclos de gelo/degelo (argamassa industrial em cima e argamassa tradicional em baixo)

3.2.3.7. Retração

Para a avaliação da retração das argamassas foram feitos provetes que foram sujeitos ao ensaio de retração livre.

A amassadura da argamassa e plano de fabrico adotado foi o descrito no ponto 3.1.5.

A cura dos provetes, tanto da argamassa industrial como da argamassa tradicional foi de 3 dias no molde, numa câmara a 20 ± 2 °C e humidade relativa de $95 \pm 5\%$. Optou-se por deixar os provetes 3 dias no molde pois, nas duas primeiras tentativas ao desenformar os provetes de argamassa industrial partiram-se devido à falta de resistência que a argamassa possuía ao fim de 48h no molde. Este molde está de acordo com o ponto 6.1 da NP EN 12808-4 (Apesar de esta norma ser direcionada para argamassas de juntas para ladrilhos, optou-se por seguir as respetivas indicações uma vez que a avaliação da retração para argamassas de revestimento não se encontra normalizada).

O molde para a realização destes provetes tem furos que permitem a fixação de *inserts*, colocadas no molde através de um sistema de porca-parafuso, que aderem à argamassa quando esta é colocada no molde.

Ao desapertar o molde para poder desmoldar os provetes, caso a argamassa não tenha resistência suficiente ou aderência ao *insert*, este roda sobre si próprio ou até mesmo entra no provete, impossibilitando a correta medição da retração, o que aconteceu nos provetes de argamassa industrial, levando à necessidade de repetir o processo 3 vezes. O provete para a medição da retração encontra-se na Figura 3.77. Após retirar o provete do molde iniciaram-se as medições da retração.



Figura 3.77 - Provete para medição da retração

As medições no micrómetro e respectivas pesagens foram feitas numa sala de conservação de provetes à temperatura de 20 ± 2 °C e humidade relativa de $65 \pm 5\%$ para diminuir a exposição dos provetes a condições distintas de armazenagem. As medições foram quase diárias já que aos fins-de-semana e feriados a medição dos provetes não era possível.

Os resultados das medições podem ser observados na Figura 3.78.

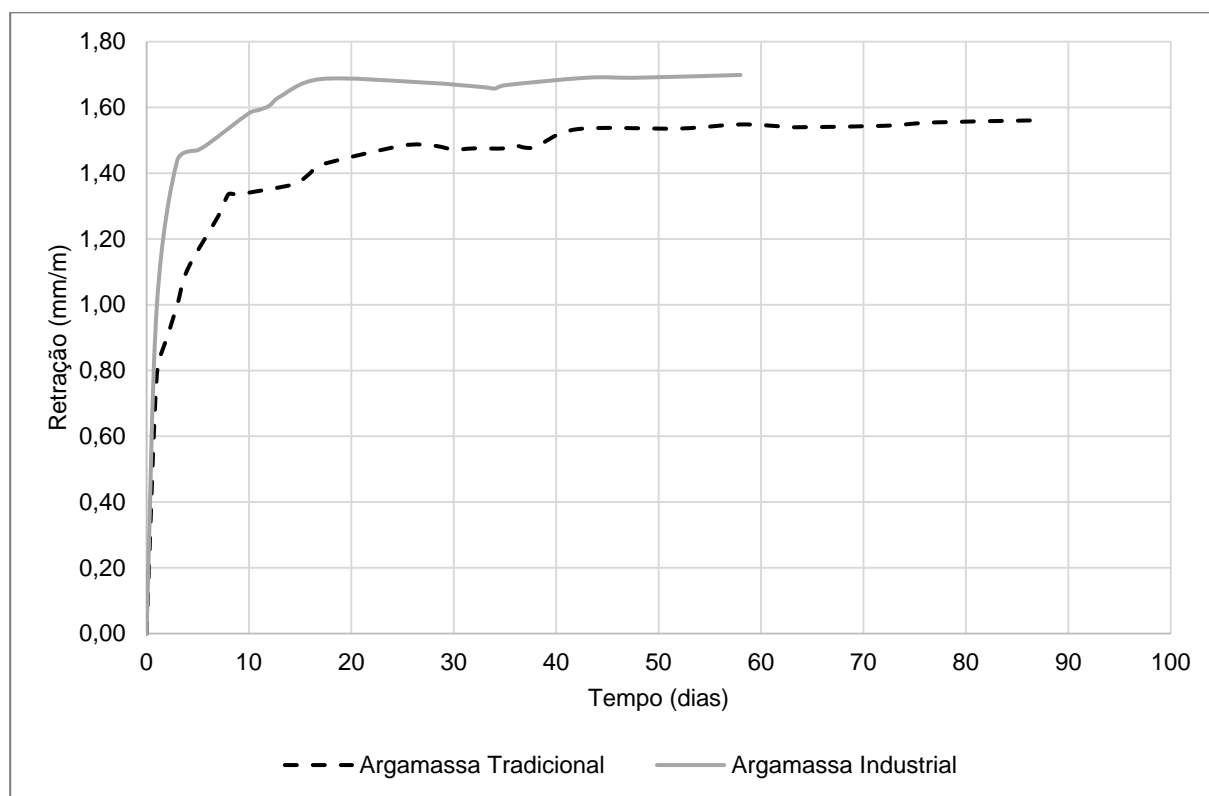


Figura 3.78 - Resultados obtidos no ensaio de retração

3.3. BIBLIOGRAFIA

Branco, J. (1993). *Revestimentos e Protecções Horizontais e Verticais em Edifícios*. 1ª. Queluz:

Emodico (2001). *Dicionário Técnico*.

EN 1015-2:1998. *Methods of test for mortar for masonry Part 2: Bulk sampling of mortars and preparation of test mortars*. Brussels: CEN. 8 p.-8 p. p.

EN 1015-3:1999. *Methods of test for mortar for masonry Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)*. Brussels: CEN. 3 p.-3 p. p.

EN 1015-6:1998. *Methods of test for mortar for masonry Part 6: Determination of consistence of bulk density of fresh mortar*. Brussels: CEN. 3 p.-3 p. p.

EN 1015-7:1998. *Methods of test for mortar for masonry Part 7: Determination of consistence of air content of fresh mortar*. Brussels: CEN. 10 p.-10 p. p.

- EN 1015-9:1999. *Methods of test for mortar for masonry Part 9: Determination of workable life and correction time of fresh mortar*. Brussels: CEN. 10 p.-10 p. p.
- EN 1015-10:1999. *Methods of test for mortar for masonry Part 10: Determination of dry bulk density of hardened mortar*. Brussels: CEN. 7 p.-7 p. p.
- EN 1015-12:2000. *Methods of test for mortar for masonry Part 12: Determination of adhesive strength of hardened rendering and plastering mortars on substrates*. Brussels: CEN. 10 p.-10 p. p.
- EN 1015-18:2002. *Methods of test for mortar for masonry Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar*. Brussels: CEN. 8 p.-8 p. p.
- Freitas, V.,Pinto, P. (1998). *Permeabilidade ao vapor de materiais de construção*. Porto.: FEUP-Departamento de Engenharia Civil.
- Gonçalves, M.,Margarido, F. (2012). *Ciência e engenharia de materiais de construção*. Lisboa: IST Press. ISBN 978-989-8481-17-7.
- Laboratório Nacional De Engenharia, Civil (1996). *Curso de especialização sobre revestimentos de paredes*. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil. ISBN 972-49-1674-X.
- Lauria, A.,Pinto, A.,Cruz, H.,Pinto, J.,Bastos, J.,Braga, M.,Farinha, M.,Moura, R.,Nogueira, R. (2006). *Reabilitação e manutenção de edifícios*. Lisboa:
- Mascarenhas, J. (2006). *Sistemas de construção descrição ilustrada e detalhada de processos construtivos utilizados correntemente em Portugal*. Lisboa: Livros Horizonte. ISBN 972-24-1339-2 (vol. 1).
- NP EN 459-3: 2011. *Cal de construção Parte 3 avaliação da conformidade*. Caparica, Portugal.: IPQ. 17 p-17 p p.
- NP EN 933-1:2014. *Ensaio das propriedades geométricas dos agregados Parte 1: Análise granulométrica : método de peneiração*. Caparica, Portugal.: IPQ. 20 p-20 p p.
- NP EN 998-1:2013. *Especificação de argamassas para alvenarias Parte 1: Argamassas para rebocos interiores e exteriores*. Portugal: IPQ. 23 p-23 p p.
- NP EN 1015-19:2008. *Métodos de ensaio de argamassas para alvenaria Parte 19: Determinação da permeabilidade ao vapor de água de argamassas de reboco endurecidos*. Portugal.: 11 p.-11 p. p.
- NP EN 1745:2005. *Alvenarias e elementos de alvenaria - Métodos para determinação de valores térmicos de cálculo*. Lisboa, Portugal.: IPQ. 59 p.-59 p. p.
- NP EN 1097-3:2002. *Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados Parte 3: Determinação da baridade e do volume de vazios*. Caparica, Portugal. : IPQ. 16 p.-16 p. p.
- NP EN 12371:2010. *Métodos de ensaio para pedra natural determinação da resistência ao gelo*. Caparica, Portugal. : IPQ. 19 p-19 p p.
- NP EN 12808-4:2007. *Argamassas de juntas para ladrilhos Parte 4: Determinação da retracção*. Portugal. : 13 p-13 p p.
- Santos, A.,Frade, D.,Pereira, R. (2014). Comportamento de argamassas à base de cal hidráulica natural ao gelo-degelo. In 2014.
- Secil, Argamassas (2012). *Ficha Técnica REABILITA Cal Reboco*.
- Secil, Argamassas (2014). *Ficha Técnica Secil Natural Lime NHL 3,5*.

Veiga, M. (2006). *Comportamento de rebocos para edifícios antigos: exigências gerais e requisitos específicos para edifícios antigos*. Lisboa: LNEC. ISBN 972-49-2063-1.

Veiga, M. (2011). *Conservação e reparação de revestimentos de paredes de edifícios antigos*. 2ª.

4

NOVOS DESENVOLVIMENTOS

4.1. INTRODUÇÃO

Atualmente não existem normas nem especificações para a avaliação da durabilidade de argamassas de cal, pelo que se fez uma pesquisa de métodos de avaliação de durabilidade de outros materiais, nomeadamente de betão, numa tentativa de os adaptar e poder realizar futuramente em argamassas. Os procedimentos de ensaios utilizados em betão foram a resistividade, profundidade de penetração de cloretos e reatividade alcalis-sílica.

4.2. ENSAIOS REALIZADOS

4.2.1. RESISTIVIDADE

4.2.1.1. Introdução

O ensaio de resistividade elétrica do betão é utilizado no controlo e monitorização da corrosão das armaduras, uma vez que são ensaios de fácil execução tanto em laboratório como em obra. Esta propriedade é importante pois aliada ao acesso de oxigénio, controla o processo eletroquímico que provoca a corrosão de armaduras envolvidas em betão, (Lencioni e Lima, 2010). A resistividade elétrica evolui ao longo do tempo, (Silva, Ferreira e Figueiras, 2012) pois a rede porosa vai-se modificando em virtude do processo de hidratação ao longo do tempo.

Existem diversos fatores que influenciam a resistividade elétrica superficial no betão, destacando-se a relação água/cimento e o teor de humidade, (Lencioni e Lima, 2010). De facto, a relação água/cimento influencia a estrutura porosa da pasta de cimento, mais especificamente o volume total de poros e a quantidade de poros de maior diâmetro. Assim, quanto maior a relação água/cimento maior o volume de poros e maior é a probabilidade de existirem poros com maiores diâmetros e interligados, sendo menor a resistividade elétrica, (Lencioni e Lima, 2010).

No betão, as medições da resistividade elétrica são influenciadas pelas condições de cura, temperatura e humidade relativa. Deste modo, quanto maior a temperatura, maior a mobilidade dos iões que transportam a corrente elétrica, originando uma diminuição da resistividade.

Outro fator de destaque é a humidade presente no betão, à medida que esta diminui, diminui a quantidade de água presente nos poros que transporta a corrente, aumentando a resistividade elétrica, (Silva, Ferreira e Figueiras, 2012), sendo que também é importante o teor de humidade superficial, (Lencioni e Lima, 2010).

Esta avaliação indireta da estrutura porosa permite analisar esta propriedade nas argamassas em estudo no presente trabalho, sendo este parâmetro um fator de grande importância.

Assim a avaliação indireta da estrutura porosa será possível pela medição da resistividade das argamassas em estudo, uma vez que a cal, embora siga um comportamento diferente do cimento, a sua rede porosa também evolui ao longo do tempo, sobretudo nos primeiros dias. Evidentemente que se prevê que se verifiquem dificuldades na medição da resistividade sobretudo no que diz respeito ao facto da rede porosa ser mais aberta e não ser conveniente saturar os provetes aquando da fase de carbonatação ao ar.

4.2.1.2. Procedimento experimental

O processo de fabrico dos provetes foi o que se encontra descrito na EN 1015-11 ponto 7.2.2. Os provetes utilizados neste ensaio estão conforme a EN 1015-11. O seu processo de cura consistiu em 2 dias no molde numa câmara de conservação de provetes à temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e a humidade relativa de $95 \pm 5\%$. Findo esse tempo, os provetes foram colocados em água à temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ durante 5 dias e posteriormente colocados numa sala de conservação de provetes à temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e humidade relativa de $65 \pm 5\%$ durante 21 dias, completando o seu processo de cura aos 28 dias de idade.

Durante avaliação da resistividade foi necessário adaptar os procedimentos e conhecimento adquirido em argamassas de cimento com o intuito de atingir o objetivo final. Deste modo, foi necessário produzir várias séries de provetes em fases sucessivas da investigação, que se apresentam em seguida:

- Série 1: Resistividade a partir dos 31 dias, de provetes com 28 dias de processo de cura e posteriormente saturados e mantidos imersos desde os 29 dias (Medição com redes a 5 mm dos topos na argamassa tradicional e à face na industrial).
- Série 2: Resistividade ao longo do processo de cura de provetes com rede metálica embebida a 5 mm dos topos (provetes de argamassa industrial inviabilizados)
- Série 3: Resistividade aos 8 dias (período de cura). Medição com placas metálicas Resistividade ao longo da cura dos provetes.

Provetes de série 1

Para a medição da resistividade foram produzidos provetes de argamassa tradicional e de argamassa industrial, tendo-se colocado em cada extremidade de cada provete uma rede metálica. Após a colocação da argamassa introduziu-se a rede metálica sendo necessário efetuar novamente compactação manual, como se pode ver na Figura 4.1 e Figura 4.2, para que a argamassa atravessasse a rede, ficando aderente à mesma. Nos provetes de argamassa tradicional foi possível deixar um espaço de 5 mm entre a rede e a face do provete, como se pode ver na Figura 4.5. Nos provetes de argamassa industrial isso não foi possível. Ao colocar a rede metálica e compactar a argamassa através de pancadas na forma, esta abateu. Além disto, ao retirar a rede metálica observou-se que a argamassa não tinha aderido à rede. Deste modo, optou-se por colocar a rede metálica na face do provete, como se pode ver na Figura 4.3 e Figura 4.4, e agitar a rede para que a argamassa aderisse à rede. Devido às pancadas aplicadas na forma, tanto na argamassa tradicional como industrial, ao desenformar-se os provetes constatou-se que os mesmos estavam muito mais compactos.



Figura 4.1 - Colocação da rede metálica na argamassa



Figura 4.2 - Compactação da argamassa após colocação da rede metálica



Figura 4.3 - Provetes de argamassa industrial ainda no molde



Figura 4.4 - Provetes de argamassa industrial para o ensaio da resistividade



Figura 4.5 - Provetes de argamassa tradicional para o ensaio da resistividade

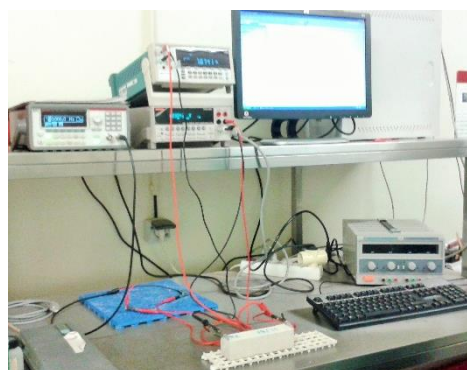


Figura 4.6 - Medição da resistividade através da rede metálica inserida nos provetes

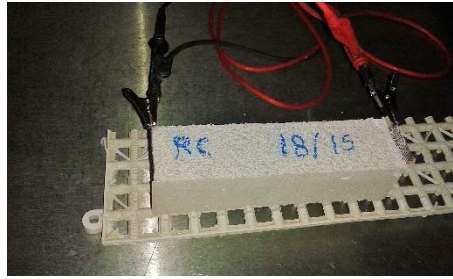


Figura 4.7 - Medição da resistividade em provetes de argamassa industrial

A rede metálica de um dos provetes de argamassa industrial, quando desmoldados, destacou-se do provete ficando esse provete inviabilizado para ensaio, como se pode ver na Figura 4.4. Estes provetes foram denominados de série 1. Na Figura 4.7 é possível observar a medição da resistividade destes provetes e na Figura 4.10 os resultados. Ao realizar as medições dos provetes aos 28 dias não houve deteção de corrente elétrica a passar no provete e, como tal, não foi possível medir a resistividade. Uma das causas possíveis foi o facto de estes provetes terem um processo de cura onde estão numa sala de conservação de provetes à temperatura de 20 ± 2 °C e à humidade de $65 \pm 5\%$ e quando completam os 28 dias já não terem humidade que permita a medição da resistividade. Deste modo, optou-se por saturar os provetes após o período de cura de 28 dias e fazer novas medições da resistividade, mantendo os provetes imersos numa solução saturada de hidróxido de cálcio no intervalo entre medições.

O processo de saturação dos provetes foi semelhante ao utilizado nos provetes de determinação da porosidade acessível à água, descrito no Capítulo 3, ponto 3.2.3.5. Os provetes permaneceram 3 horas em vácuo à pressão de 50 mbar (5 KPa). Com a bomba de vácuo ainda em funcionamento, foi colocada uma solução saturada de hidróxido de cálcio em água destilada onde os provetes ficam submersos nesta solução por 1 hora. Decorrido este tempo a bomba de vácuo foi desligada e foi medida a resistividade dos provetes. Os provetes, após saturação, foram mantidos imersos na solução de hidróxido de cálcio.

Os resultados obtidos no ensaio de resistividade para a série 1 encontram-se na Figura 4.10.

Provetes de série 2

Para que os provetes, tanto da argamassa tradicional como da argamassa industrial estivessem sob as mesmas condições, de modo a realizar comparação dos resultados obtidos, foram produzidos novos provetes. Nestes tentou-se colocar a rede metálica a cerca de 5 mm da face do provete. Experimentou-se medir a resistividade aos 2 dias, como se pode ver na Figura 4.6, onde os provetes de argamassa tradicional resistiram às medições e como tal deu-se continuidade ao ensaio para estudar a evolução da resistividade ao longo do processo de cura. No entanto, da argamassa industrial não resistiu nenhum provete pois, quando se mediu a resistividade, a rede metálica separou-se da argamassa quando foram colocadas as pinças para medição da resistividade, como se pode verificar na Figura 4.8. Estes provetes foram denominados de série 2.



Figura 4.8 - Provetes de argamassa tradicional (à esquerda) e provetes de Argamassa Industrial (à direita)

Aos 2, 6 e 14 dias de idade foi possível medir a resistividade dos provetes uma vez que estes ainda se encontram com humidade devido ao processo de cura. No entanto, as leituras obtidas aos 14 dias não foram válidas. Ao realizar as medições dos provetes aos 21 dias não houve deteção de corrente elétrica a passar no provete e, como tal, não foi possível medir a resistividade. Deste modo, optou-se por saturar os provetes tal como o descrito nos provetes da série 1 e mantê-los no intervalo entre medições numa solução saturada de hidróxido de cálcio e assim foi possível prolongar as medições no tempo.

Os resultados obtidos no ensaio de resistividade para a série 2 encontram-se na Figura 4.11.

Provetes da série 3

Foram realizados, para este efeito novos provetes, prismáticos de 40 x 40 x 160 mm, onde para não fragilizar os provetes não foi colocada a rede metálica. A medição da resistividade foi efetuada com recurso a placas metálicas retangulares nas extremidades dos provetes, como se pode ver na Figura 4.9.

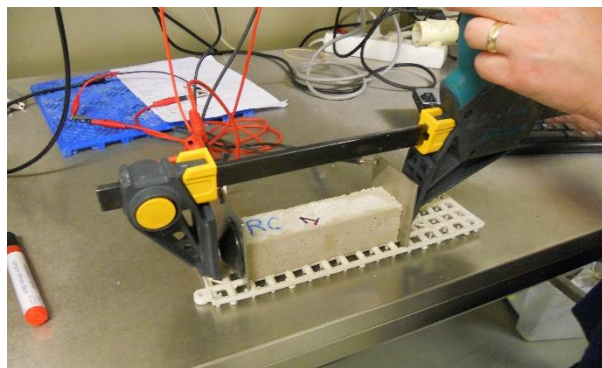


Figura 4.9 - Medição da resistividade com recurso a placas metálicas

A resistividade foi medida tanto nos provetes de argamassa tradicional como na argamassa industrial aos 8 dias de idade. No entanto, aos 14 dias não foi possível medir a resistividade através deste método. Uma das causas possíveis será o facto de a medição da resistividade depender da humidade superficial do provete e como estes provetes já se encontravam no processo de cura ao ar há 7 dias já não existia humidade à superfície do provete não sendo possível realizar medições. Estes provetes foram denominados de série 3.

Os resultados obtidos no ensaio de resistividade para a série 3 encontram-se na Figura 4.12.

Obtidos os valores nas diferentes medições, calculou-se a resistividade através da seguinte expressão:

$$R = \frac{V}{I} \Leftrightarrow R = \rho \cdot \frac{L}{A} \Leftrightarrow \rho = \frac{V}{I} \cdot \frac{A}{L} \quad (4.1)$$

Onde:

R – resistência elétrica (Ω)

I – intensidade de corrente (A)

V – diferença de potencial (V)

ρ – resistividade elétrica ($\Omega \cdot m$)

A – área do eléctrodo que esteve em contacto com o provete (m^2)

L – distância entre eléctrodos (m)

Dos provetes de argamassa tradicional foi possível estudar a evolução da resistividade desde a desmoldagem, uma vez que foram produzidas duas séries, uma delas iniciou-se as medições de resistividade aos 28 dias e outra desde a desmoldagem e em ambos os casos os provetes não se degradaram.

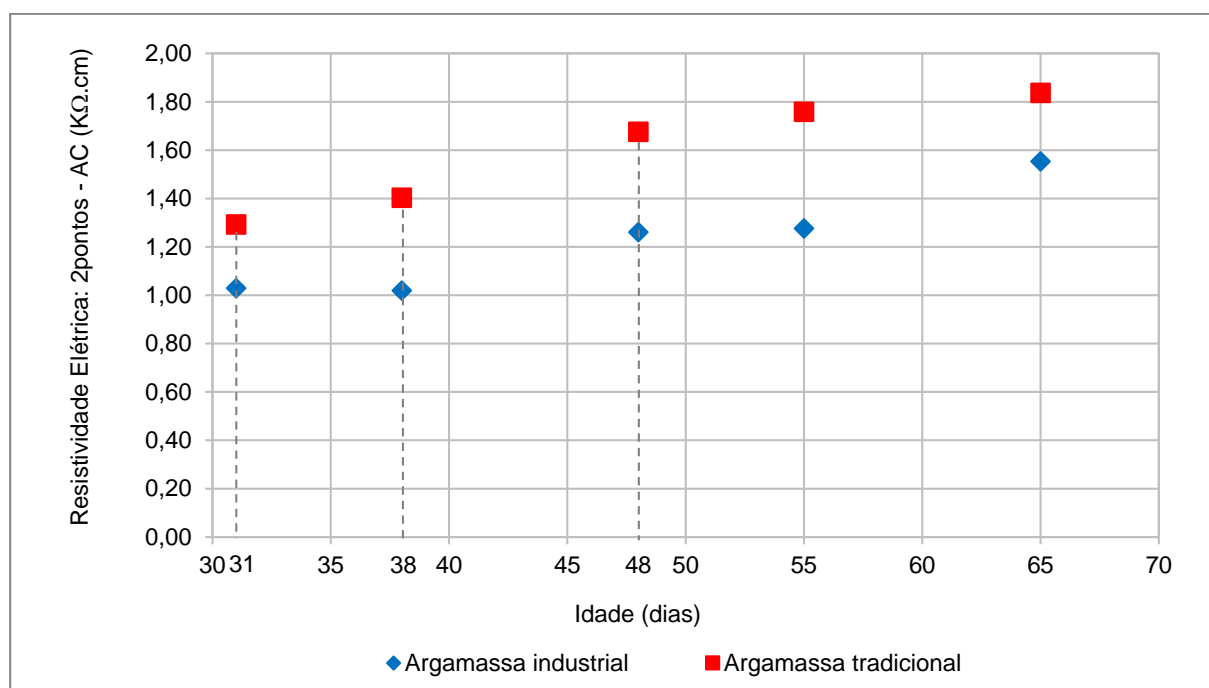


Figura 4.10 – Resultados obtidos para a série 1. Resistividade a partir dos 31 dias em provetes com 28 dias de processo de cura e posteriormente saturados e mantidos imersos desde os 29 dias (Medição com redes a 5 mm dos topos na argamassa tradicional e à face na industrial)

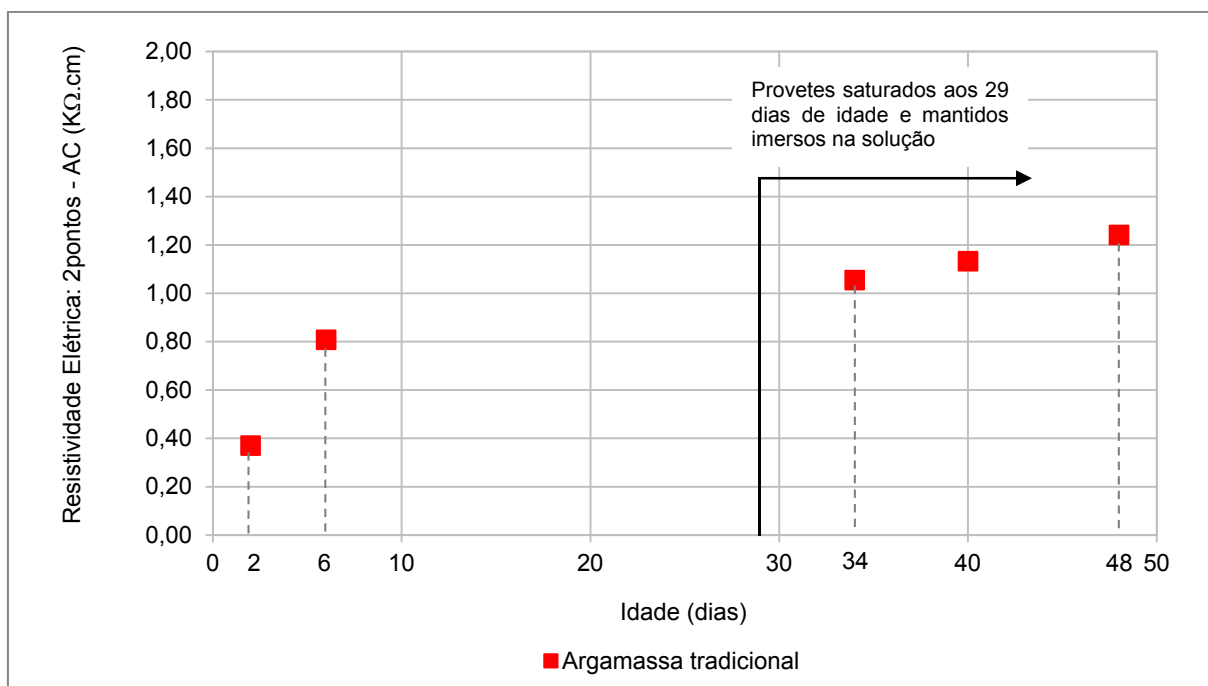


Figura 4.11 - Resultados obtidos para a série 2. Resistividade ao longo do processo de cura de provetes com rede metálica embebida a 5 mm dos topos (provetes de argamassa industrial inviabilizados)

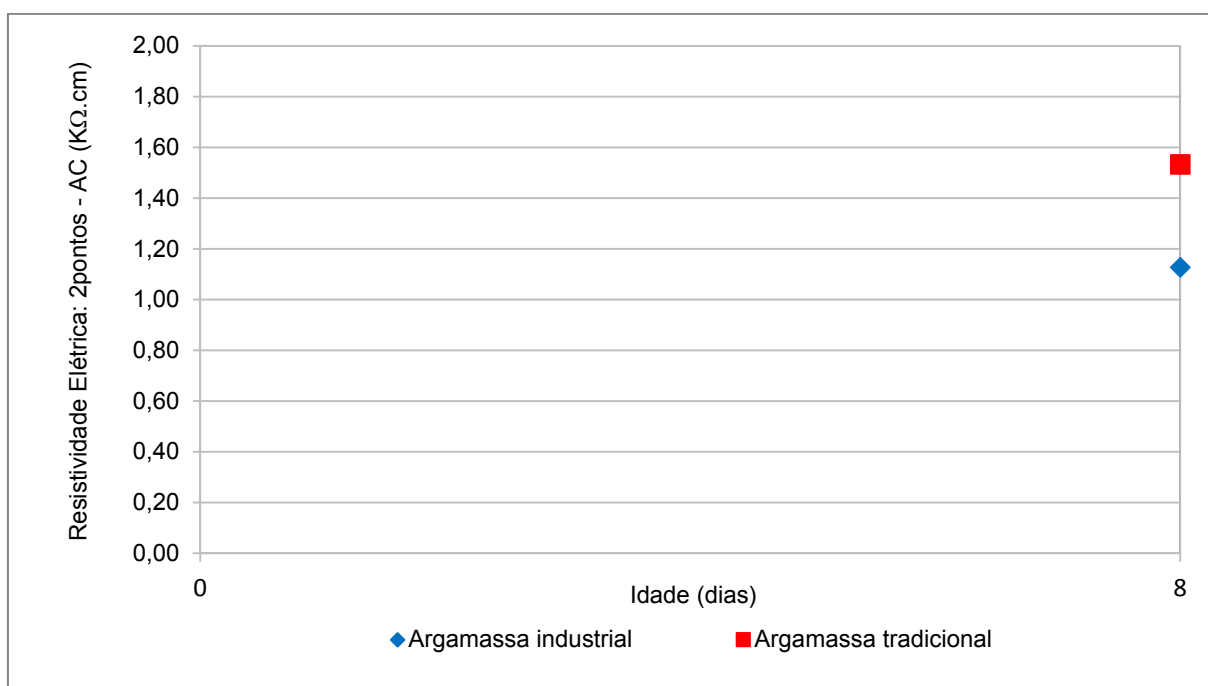


Figura 4.12 - Resultados obtidos para a série 3. Resistividade aos 8 dias (período de cura). Medição com placas metálicas

4.2.2. RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE SAIS – CLORETOS

4.2.2.1. Introdução

Para o betão é de grande importância analisar a profundidade de penetração de cloretos como método de estudo da durabilidade do mesmo. Os cloretos, apesar de alterarem o tempo de presa do cimento e a velocidade de endurecimento, não são perigosos para o betão simples pois não formam compostos indesejáveis quando combinados com os componentes do cimento. No entanto, para o betão armado ou pré-esforçado os cloretos já são nocivos pois promovem a oxidação das armaduras sob a forma de ferrugem provocando a diminuição da sua secção e também expansão, uma vez que a formação de ferrugem é acompanhada pelo aumento de volume, fissurando o revestimento e acelerando ainda mais o processo de corrosão, (Matos, 2010).

Do ponto de vista do estudo nas argamassas à base de cal hidráulica natural, é relevante estudar a penetração de cloretos uma vez que a penetração de sais nas argamassas de revestimento e os sucessivos ciclos de cristalização e recristalização levam à degradação da sua estrutura interna, como referido no Capítulo 2.

4.2.2.2. Procedimento experimental

Este ensaio decorreu segundo a E – 463 do LNEC. Esta especificação é aplicada a betão. No entanto, foram elaborados provetes de argamassa de cal hidráulica natural e sujeitos ao procedimento estabelecido.

Os provetes utilizados no ensaio de resistência à penetração de cloretos são cilíndricos, e devem ter 100 mm de diâmetro e 50 mm de altura para que ao colocar os provetes nas células do ensaio, como se pode ver na Figura 4.27, estas fiquem totalmente estanques e promova um fluxo unidirecional da solução com cloretos.

O processo de fabrico adotado destes provetes cilíndricos consistiu em colocar a argamassa em duas camadas. Em cada camada foi efetuada compactação manual com um pilão de madeira, com 25 pancadas.



Figura 4.13 - Molde utilizado na fabricação dos provetes

Provetes experimentais

Ao fim de 48h de cura, (especificado na tabela 1 da EN 1015-11, ponto 7.3), desmoldaram-se os provetes de argamassa industrial e argamassa tradicional, moldados num molde constituído por um tubo de PVC com 95 mm de diâmetro interno e 50 mm de altura assente num azulejo, como se pode ver na Figura 4.13. Este molde foi utilizado por lapso, no entanto os provetes daí resultantes foram utilizados como

teste para adaptar o procedimento de ensaio aos provetes de argamassa de cal hidráulica uma vez que não se conhecia o comportamento deste material neste ensaio. Ao desenformar estes provetes, ficou no azulejo argamassa pois esta ainda não tinha ganho presa devido à altura do molde. A partir deste insucesso, definiu-se prolongar o processo de cura no molde dos restantes provetes por mais um dia.

Ao desmoldar os restantes provetes sucedeu o mesmo, ficando alguns deles em muito mau estado, como se pode ver na Figura 4.14, Figura 4.15 e Figura 4.16. Em consequência foram fabricados mais provetes, por outro método, ficando os primeiros como provetes de teste para adaptar o procedimento de ensaio, uma vez que, como já referido, a experiência anterior era relativa a betão e argamassa de cimento.



Figura 4.14 - Argamassa na base do molde após início da desmoldagem



Figura 4.15 - Provetes deteriorados após desmoldagem



Figura 4.16 - Provetes deteriorados após desmoldagem

Provetes finais

O molde utilizado para fabricar os novos provetes encontra-se na Figura 4.17. Nestes, colocou-se folha de acetato no fundo e nos lados para que o provete não sofresse com as ações provocadas durante a desmoldagem, nem para que argamassa aderisse ao molde, como se pode ver na Figura 4.18 e Figura 4.19. O processo de colocação da argamassa foi o mesmo utilizado nos primeiros provetes. Entre o acetato e o molde foi colocada vaselina para facilitar a retirada dos provetes.

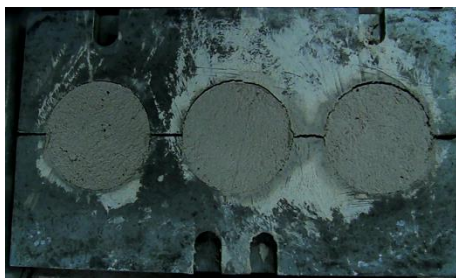


Figura 4.17 - Provete no molde metálico



Figura 4.18 - Retirada da folha de acetato do provete



Figura 4.19 - Retirada da folha de acetato da base do provete



Figura 4.20 – Provete após desmoldagem

A desmoldagem destes provetes exigiu muitos cuidados para não causar danos, como se pode ver na Figura 4.20. Foram então colocados em água a 20 ± 2 °C durante 5 dias e posteriormente colocados numa sala de conservação de provetes a 20 ± 2 °C e humidade relativa de $65 \pm 5\%$ durante 21 dias.

Saturação

Decorrido esse período, os provetes foram sujeitos ao processo de saturação descrito no Capítulo 3, ponto 3.2.3.5, o mesmo processo usado para a saturação de provetes para determinação da porosidade acessível à água, como se pode ver na Figura 4.21, Figura 4.22 e Figura 4.23.



Figura 4.21 - Provete antes de serem submetidos ao procedimento de saturação



Figura 4.22 - Provete sujeitos ao vácuo



Figura 4.23 - Colocação da solução saturada de hidróxido de cálcio dentro da câmara

Montagem nas células

Depois desta preparação tentou-se colocar os provetes nas células de ensaio e constatou-se que estes não possuíam diâmetro suficiente, tinham 95 mm quando o necessário é de 100 mm para que a célula do ensaio ficasse totalmente preenchida e não existisse perdas de solução. De facto, tinha havido uma troca nos moldes utilizados. Como tal, envolveram-se os provetes com fita-cola por forma obter o diâmetro necessário para as células, como se pode ver na Figura 4.24 e Figura 4.25.



Figura 4.24 - Envolvimento dos provetes experimentais em fita-cola



Figura 4.25 - Medição do provete com o paquímetro para verificar se o diâmetro desejado fora atingido

Não se tendo conhecimento sobre as consequências deste ensaio em provetes de argamassa de cal hidráulica, seria uma ajuda fundamental testar este material antes de o sujeitar a ensaio.

Diferença de potencial e validação da profundidade de penetração

Uma das grandes dúvidas foi a voltagem a utilizar neste tipo de material. Este material, pelo facto de ser mais poroso, permite a passagem de uma maior intensidade de corrente. Quando se aplicou uma diferença de potencial de 30 Volts, valor usual com que se inicia o ensaio em betão, o aparelho não detetou a intensidade de corrente que passou nos provetes experimentais. Uma das causas possíveis terá

sido o facto de a argamassa ser tão porosa que provocou um valor da intensidade de corrente não detetável pelo equipamento de medição.

Aplicaram-se vários níveis de voltagem e a que se considerou como ideal para a passagem de corrente foi a diferença de potencial de 10 Volts. Com base no Quadro 1 do anexo 2 da Especificação do LNEC, 463, estimou-se a duração do ensaio de 6 horas uma vez que a nova corrente inicial admissível quando é aplicada uma diferença de potencial de 10 Volts foi cerca de 150 mA, superior a 120 mA como especificado no quadro. Durante o teste destes provetes constatou-se que a diferença de potencial diminuía para cerca de 8 Volts. Na Figura 4.26 e na Figura 4.27 é possível observar os provetes experimentais durante a aplicação de corrente elétrica.

Nesta fase do ensaio, é também possível calcular a resistividade dos provetes, uma vez que estes se encontram completamente saturados. O cálculo foi realizado de acordo com a equação 4.1, tendo-se obtido valores médios para a resistividade de 1,38 KΩcm para a argamassa tradicional e 0,97 KΩcm para a argamassa industrial.

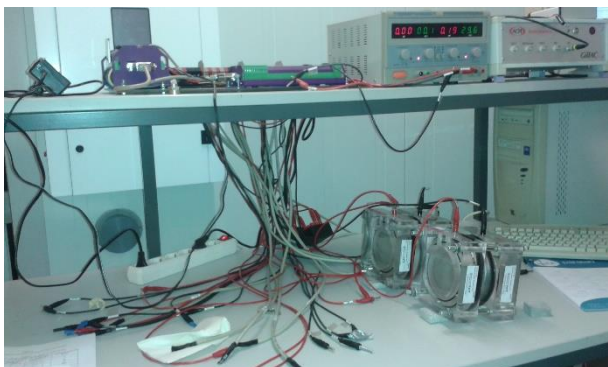


Figura 4.26 - Provetes durante a aplicação de corrente elétrica



Figura 4.27 - Células de ensaio

Para medir a profundidade de penetração de cloretos é necessário partir, em duas metades semelhantes cada um dos provetes, sendo que em betão é utilizado o método de compressão diametral. No entanto para provetes de cal este método seria muito agressivo devido à fragilidade dos mesmos, podendo destruí-los. Optou-se por serrar os provetes na direção diametral de modo a não interferir com as faces planas do provete, como está representado na Figura 4.28. Após o corte dos provetes, estes foram pulverizados com nitrato de prata e expostos à luz durante 15 minutos, como se pode ver na Figura 4.29.

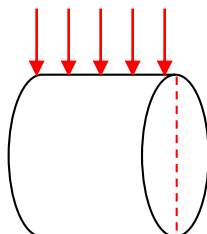


Figura 4.28 – Representação esquemática da direção de corte dos provetes



Figura 4.29 - Provete exposto à luz

Ao analisar os provetes após a atuação do nitrato de prata, constatou-se que houve penetração quase total dos cloretos nos provetes de argamassa, como se pode observar na Figura 4.30 e na Figura 4.31. Como tal, para ser possível a medição da profundidade de penetração no ensaio e a possível comparação de resultados optou-se por reduzir a diferença de potencial aos provetes para 8 Volts, para que a corrente que passe seja de aproximadamente 5 Volts, uma vez que verifica-se perda de corrente.



Figura 4.30 - Provetes experimentais de argamassa industrial após pulverização de nitrato



Figura 4.31 - Provetes experimentais de argamassa tradicional após pulverização de nitrato

Ensaio dos provetes finais

Os provetes sujeitos ao ensaio tiveram o mesmo processo de saturação que os provetes experimentais. A colocação dos provetes de argamassa tradicional nas células não necessitou do revestimento com fita-cola. No entanto, após colocar os provetes nas células e verificar a estanquidade dos mesmos, como se pode verificar na Figura 4.32 observou-se que um dos provetes começou a fissurar como se pode observar na Figura 4.33. Quanto aos provetes de argamassa industrial, duas das três células de ensaio não se encontravam estanques. Deste modo, desmontaram-se as células para avaliar o estado dos provetes. Após desmontagem constatou-se que um deles degradou-se, como se pode observar na Figura 4.34 e na Figura 4.35, ficando inviabilizado para ensaio, o outro foi revestido com fita-cola para o proteger e ser possível apertar mais fortemente a célula.



Figura 4.32 - Colocação de água nas células para verificar a sua estanquidade

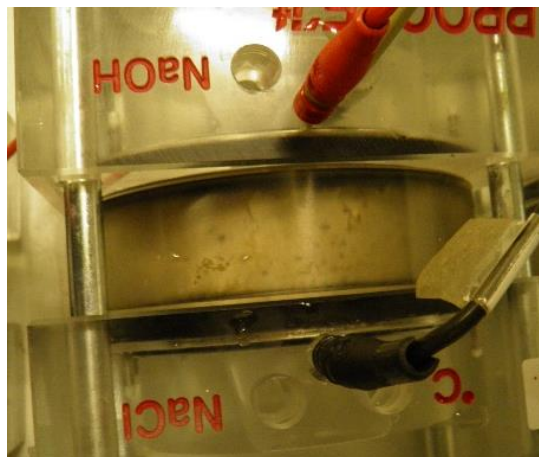


Figura 4.33 - Provete de argamassa tradicional fissurado na célula



Figura 4.34 - Provete degradado após desmontado da célula, antes do ensaio (face cofrada)



Figura 4.35 - Provete degradado após desmontado da célula, antes do ensaio (face não cofrada)

Os provetes foram serrados pelas faces planas, como se pode ver na Figura 4.36, uma vez que ao serrar os provetes experimentais na direção representada na

Figura 4.28 estes sofreram alguns danos. O nitrato de prata foi aplicado após serragem e o resultado da sua aplicação nos provetes pode ser observada nas Figura 4.37 e Figura 4.38.



Figura 4.36 - Serragem dos provetes

A determinação da profundidade de penetração de cloretos, para a argamassa tradicional, foi efetuada através da colocação de uma régua ao longo da linha que limita a penetração dos cloretos e foi medida a sua profundidade no ponto médio do provete, como se pode ver na Figura 4.39. Não se efetuaram cálculos para determinar a profundidade média pois esta é constante, como se pode observar na Figura 4.38. Os resultados obtidos na medição encontram-se na Tabela 4.1. Quanto aos provetes de argamassa industrial apenas foi possível fazer a medição num dos provetes.

Tabela 4.1 - Resultados obtidos no ensaio de penetração de iões cloretos

Tipo de Argamassa	Valor médio (mm)	Desvio padrão
Tradicional	20,17	1,34
Industrial	8,5	N.R.



Figura 4.37 - Provetes de argamassa industrial após pulverização com nitrato de prata e expostos à luz fluorescente



Figura 4.38 - Provetes de argamassa tradicional após pulverização com nitrato de prata e expostos à luz fluorescente



Figura 4.39 - Medição da profundidade de penetração de cloretos nos provetes de argamassa tradicional

4.2.3. REATIVIDADE ÁLCALIS-SÍLICA

4.2.3.1. Introdução

A reação álcalis-agregado (ASR – Alkali-silica reaction) é uma das causas de degradação do betão, incidindo sobre os agregados quando contém sílica reativa, (Coutinho, 2005).

A expansão e consequente deterioração do betão deve-se à possível reação entre determinados tipos de sílica que existam nos agregados e a solução que circula nos poros e fendas do betão que é uma solução saturada em hidróxido de cálcio que contém sódio e potássio em quantidades variáveis, (Coutinho, 2005).

Este tipo de degradação favorece significativamente outros processos de deterioração, nomeadamente, a corrosão das armaduras no caso do betão armado, (Neves, 2010).

Para que a reação álcalis-sílica se desenvolva é necessário verificar uma alcalinidade suficientemente elevada da solução intersticial do betão, a existência de agregados reativos com concentrações dentro duma gama crítica e humidade elevada, (Matos e Coutinho, 2015). A ASR só ocorrerá na presença de todas estas condições e caso algum dos fatores não ocorra, não haverá degradação do betão.

A origem dos álcalis encontra-se na matéria-prima utilizada no fabrico do cimento, principalmente do calcário, marga, argila, xisto argiloso e do carvão, quando é utilizado combustível, encontrando-se fundamentalmente sob a forma de sulfatos, silicatos e aluminatos. Para além do cimento, os álcalis podem também ter origem em alguns minerais dos agregados, no contacto com a água do mar ou nos químicos utilizados em ações de degelo, Neves (2010) cita Fernandes em “Caracterização petrográfica, química e física de agregados graníticos em betões” de 2005. É neste contexto que surge o interesse de estudar a reação álcalis-sílica em argamassas à base de cal hidráulica natural uma vez que as matérias-primas utilizadas no fabrico deste ligante são o calcário, marga e carvão, como combustível.

No cimento, a presença de álcalis resulta do processo de calcinação do clínquer do cimento, em que os iões K^+ e Na^+ são vaporizados pelas altas temperaturas do forno, acabando por condensar à medida que o material é transportado através dele e criar uma camada de álcalis na superfície do clínquer. Estes álcalis que permanecem na sua superfície, sulfatos alcalinos, são facilmente solubilizados na água de amassadura, enquanto os que se encontram dentro da sua estrutura, aluminatos e silicatos, são libertados lentamente durante o processo de hidratação, (Neves, 2010).

Uma vez que para a cal não existem dados sobre a sua reatividade com o alcali, optou-se por fazer um estudo da mesma.

A reação entre os iões hidroxilo e a sílica reativa é restringida à superfície do grão de agregado, sendo deste modo o grau de expansão do betão influenciado pela superfície específica do agregado e pela granulometria e em menor extensão pela sua forma e textura, Neves (2010) cita Hobbs em “Alkali-silica reaction in concrete” de 1998. A superfície específica pode ser definida como a área total de superfície por unidade de massa ou volume sendo, no entanto, geralmente apresentada relativamente à massa. Este parâmetro é inversamente proporcional à dimensão de um agregado e, dessa forma, quanto mais fina for uma partícula, maior será a sua superfície específica e consequentemente maior será a quantidade de sílica disponível para a reação álcalis-sílica, (Neves, 2010).

Sendo as argamassas à base de cal hidráulica natural constituídas por agregados finos, nomeadamente areias, torna-se mais uma vez importante averiguar a sua reatividade com os álcalis.

4.2.3.2. Procedimento experimental

No presente trabalho avaliou-se a reatividade ao álcalis-sílica dos provetes de argamassa à base de cal hidráulica natural. No entanto, não se sabe quais as consequências do procedimento do ensaio sobre os provetes de argamassa de cal, uma vez que são muito frágeis.

Para a avaliação da reatividade álcalis-sílica foram testados provetes de argamassa tradicional e industrial para verificar se resistiam ao procedimento de ensaio. Como tal, utilizaram-se prismas de 40 x 40 x 160 mm e colocaram-se em banho-maria num recipiente com água a 80 °C durante 24 horas. Findo esse tempo, colocaram-se os provetes, numa solução de NaOH a 80 °C. Os provetes de argamassa tradicional aguentaram todo o procedimento, como se pode ver na Figura 4.40. Os provetes de argamassa industrial resistiram às 24 horas em água a 80 °C e foram colocados na solução de NaOH a 80 °C. No entanto, ao fim de 24 horas na solução de NaOH a 80 °C estes não resistiram, ficando desfeitos, como se pode observar na Figura 4.41. Como tal, optou-se por mudar o procedimento, nomeadamente variar a temperatura do banho-maria. Em vez de utilizar a água e o NaOH à temperatura de 80 °C, utilizou-se a 20 °C para ver a sua influência nos provetes e verificar se o ensaio não é tão agressivo para os mesmos ao ponto de destruí-los, não tendo assim uma base de comparação.

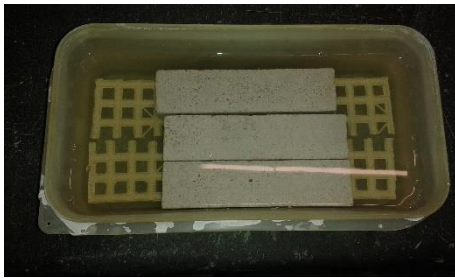


Figura 4.40 - Provetes experimentais de argamassa tradicional



Figura 4.41 - Provete experimental de argamassa industrial

Além das argamassas em estudo, argamassa tradicional e industrial, para este ensaio produziu-se um terceiro tipo de argamassa com cal e areia que se sabia ser reativa (areia CEN) mas alterando a sua granulometria de forma a ser equivalente à granulometria da areia usada na argamassa tradicional. A composição usada neste terceiro tipo de argamassa foi também idêntica à da argamassa tradicional CEN para obter as quantidades necessárias de cada fração, como se pode ver na Figura 4.42.



Figura 4.42 - Composição da areia normalizada

As dimensões dos provetes utilizados neste ensaio para argamassas de cimento são de 25 x 25 x 250 mm, exigindo da argamassa muita resistência nas primeiras idades. Desmoldar provetes de argamassa de cal com estas dimensões seria uma tarefa muito complicada devido à fragilidade dos mesmos. Como tal, optou-se por utilizar os moldes para fabricar provetes para o ensaio de resistência ao ataque por sulfatos, de dimensões de 20 x 20 x 160 mm, como se encontra na especificação E 462 e na Figura 4.43.



Figura 4.43 - Molde utilizado na fabricação dos provetes para o ensaio ASR

O processo de fabrico destes provetes consistiu em colocar argamassa, tendo em atenção a colocação de argamassa o melhor possível junto dos pernos metálicos e compactar com as pancadas necessárias até se considerar que a argamassa estava bem compactada. No entanto, ao desmoldar os provetes um dos de argamassa industrial partiu-se, ficando inviável para ensaio. Os provetes sujeitos a ensaio encontram-se na Figura 4.44.



Figura 4.44 - Provetes realizados para o ensaio ASR

Após os 28 dias de cura os provetes foram colocados em água a 20 ± 2 °C durante 24 horas, como mostra a Figura 4.45. Terminado esse período foram retirados da água, enxugados e procedeu-se à leitura inicial, ou leitura 0, como se pode ver na Figura 4.47. Antes de cada leitura procedeu-se à calibração do equipamento, como se pode ver na Figura 4.46.

Feita a leitura inicial, retiraram-se os provetes da água e foram colocados numa solução de NaOH também a 20 ± 2 °C. Posteriormente foram feitas duas leituras por semana para avaliar a evolução dos provetes nos primeiros 14 dias de ensaio.



Figura 4.45 - Provetes em água



Figura 4.46 - Calibração do equipamento



Figura 4.47 - Leitura inicial do provete

Após a medição das leituras calculou-se a média aritmética do comprimento real em cada dia de cada provete e calculou-se a expansão, $e(\%)$, de cada provete através da seguinte expressão:

$$e(\%) = \frac{L_i - L_0}{160} \cdot 100 \quad (4.2)$$

Onde:

L_i é o comprimento médio em cada dia, L_0 é a leitura zero e 160 mm é a base de medida dos provetes.

Os resultados obtidos no ensaio encontram-se na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Resultados obtidos no ensaio à reatividade alcalis-sílica

Dia	Argamassa Tradicional		Argamassa tradicional com areia normalizada		Argamassa industrial	
	Expansão média (%)	Desvio padrão	Expansão média (%)	Desvio padrão	Expansão média (%)	Desvio padrão
leitura 0	0,00	0,000	0,00	0,000	0,00	0,000
2	0,01	0,010	0,01	0,003	0,01	0,005
6	0,02	0,006	0,01	0,003	0,03	0,010
9	0,02	0,008	0,01	0,003	0,03	0,006
14	0,02	0,009	0,02	0,004	0,03	0,008
21	0,02	0,010	0,01	0,003	0,03	0,007
26						

4.3. BIBLIOGRAFIA

Coutinho, J. (2005). *Melhoria da durabilidade dos betões*. Porto: ISBN ISBN 972-752-073-1.

EN 1015-11:1999. *Methods of test for mortar for masonry Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar*. Brussels: CEN. 12 p.-12 p. p.

E 463-2004. *Betões. Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por ensaio de migração em regime não estacionário*. Lisboa, Portugal.: LNEC. 8 p.-8 p. p.

E 463-2004. *Cimentos. Resistência dos cimentos ao ataque por sulfatos*. Lisboa, Portugal. : LNEC. 4 p.-4 p. p.

Lencioni, J., Lima, M. (2010). Principais fatores intervenientes nas medidas de resistividade elétrica superficial do concreto – Estado-da-Arte. In *VI Congresso internacional sobre patologia e reabilitação de estruturas*. Brasil: 2010.

Matos, A. (2010). *Estudo de argamassas com substituição parcial de cimento por resíduos de vidro moídos*. Porto: [s. n.].

Matos, A., Coutinho, J. (2015). ASR and sulphate performance of mortar containing industrial waste. *Structural Concrete*,

Neves, J. M. M. (2010). *Reacções álcalis-sílica e resistência aos sulfatos em betão ensaios*. Porto: [s. n.].

Silva, P., Ferreira, R., Figueiras, H. (2012). Medições de resistividade elétrica avaliada em provetes de betão: influência do método de ensaio e das condições de cura. In *Encontro Nacional BETÃO ESTRUTURAL*. FEUP - Porto: 2012.

5

ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

5.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

O presente capítulo tem como objetivo analisar os resultados obtidos nos diferentes ensaios realizados, através da comparação entre os resultados da argamassa industrial com a argamassa tradicional e destes com os dados fornecidos pelas normas.

5.2. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

5.2.1. PRODUTO INDUSTRIAL E MISTURAS EM SECO

Atendendo aos resultados obtidos nos ensaios de granulometria concluiu-se que o traço de argamassa tradicional que melhor se ajustava à curva granulométrica da argamassa industrial é a argamassa 3, com o traço 1:2,2 de cal hidráulica : areia.

Assim, a composição da argamassa 3 foi a utilizada na confecção dos provetes para a avaliação das suas propriedades no estado endurecido.

A Argamassa Industrial e a Argamassa 3 são as mais equilibradas, como se pode ver na Figura 3.9 do Capítulo 3 ponto 3.2.1.1, uma vez que a curva granulométrica é bem distribuída.

5.2.2. PRODUTO EM PASTA

5.2.2.1. Água de amassadura, trabalhabilidade e espalhamento

Através deste ensaio foi possível confirmar que a adição de agregados de menores dimensões aumentam a trabalhabilidade de uma argamassa, mas deverá ser controlada devido ao provável aumento de retração.

A água de amassadura, tendo em atenção as dosagens, também aumenta a trabalhabilidade, como seria de esperar. No entanto, há que verificar se o aumento da água de amassadura não irá provocar um aumento da segregação do material, fenómeno ocorrido na avaliação da trabalhabilidade da Argamassa 1. Ao adicionar maiores quantidades de água foi possível aumentar o espalhamento da mesma, no entanto, ocorreu segregação do material prejudicando a trabalhabilidade.

Como se pode observar, na Tabela 5.1, a Argamassa 3 respeita a recomendação do fabricante quanto à percentagem de água de amassadura de 15%, Ficha Técnica NHL 3,5, Secil Argamassas, e possui um

espalhamento dentro dos valores recomendados pelo fabricante. Esta composição foi a única a respeitar os dois requisitos em simultâneo para as argamassas tradicionais.

5.2.2.2. Ar Contido

Segundo a NP EN 998-1:2013, o teor de ar do produto em pasta deve ser um parâmetro a avaliar e comparar pelos valores declarados pelo fabricante. O ar contido de uma argamassa é influenciado pela dimensão dos agregados, pela água de amassadura que esta contém e também pelos aditivos, se existirem.

Analisando a Tabela 5.1 nas argamassas tradicionais, em especial no traço da Argamassa 1, é notória a influência da água de amassadura. Na Argamassa 1 utilizaram-se duas percentagens de água de amassadura, onde para a argamassa com 14,8%, o ar contido era de 12% e para a argamassa com 15,9%, o ar contido era de 17%. Isto permite verificar que quanto maior é a percentagem de água de amassadura maior é o ar contido na argamassa.

A granulometria dos agregados é outro fator que influencia o ar contido numa argamassa. A argamassa 1 é a argamassa que possui agregados de maiores dimensões. Esta argamassa, para percentagens de água de amassadura menores ou maiores, como foi estudado, apresenta sempre maior percentagem de ar contido que as restantes argamassas. À medida que se vai aumentando a quantidade de inertes de menores dimensões às argamassas, menor é o ar contido das mesmas. Esta observação é evidente nas argamassas 1, 3, 4 e 2 onde a quantidade de agregados de menor dimensão vai aumentando, enquanto que o ar contido nas mesmas vinha decrescendo, respetivamente, como se pode ver na Tabela 5.1, correspondendo a argamassas mais compactas e provavelmente mais densas.

Na argamassa industrial para uma percentagem de água de amassadura de 19% observou-se um valor de 17% de ar contido, valor inferior ao declarado pelo fabricante que é de $25,0 \pm 5,0\%$.

Tabela 5.1 - Água de amassadura e ar contido das argamassas

Tipo de Argamassa	Água de Amassadura (%)	Ar contido (%)
Industrial	19,0	17,0
Argamassa 1	15,9	17,0
Argamassa 1 ⁽¹⁾	14,8	12,0
Argamassa 2	15,5	7,4
Argamassa 3	15,0	8,4
Argamassa 4	15,4	7,4

(1) Variou-se a percentagem de água de amassadura relativamente à Argamassa 1.

5.2.2.3. Massa volúmica

Segundo a NP EN 998-1:2013, a massa volúmica do produto em pasta deve ser um parâmetro a avaliar e comparar com os valores declarados pelo fabricante. Segundo indicações do fabricante a massa volúmica da argamassa industrial em estudo é de $1610 \pm 130 \text{ kg/m}^3$, estando a argamassa industrial fora do intervalo indicado.

A Massa volúmica do produto em pasta é influenciada pela dimensão dos agregados e pela água de amassadura.

Tal como o que sucedera com o ar contido, a massa volúmica é menor quanto maior for a percentagem de água de amassadura utilizada. Isto pode ser verificado na Argamassa 1. Para 15,9% de água de amassadura, a massa volúmica desta argamassa é de 1870 kg/m^3 e para 14,8% é de 1934 kg/m^3 .

Outro fator que influencia é a dimensão dos agregados, quanto menor a dimensão dos mesmos maior é a massa volúmica da argamassa, como se pode ver na Tabela 5.2. Isso é bem visível nas argamassas 1, 3, 4 e 2, pois à medida que aumenta a quantidade de agregados finos na sua composição maior é a massa volúmica da argamassa respetivamente.

Tabela 5.2 - Água de amassadura e massa volúmica das argamassas

Tipo de Argamassa	Água de Amassadura (%)	Massa Volúmica (kg/m^3)
Industrial	19,0	1762
Argamassa 1	15,9	1870
Argamassa 1 ⁽¹⁾	14,8	1934
Argamassa 2	15,5	2020
Argamassa 3	15,0	2018
Argamassa 4	15,4	2041

(1) Variou-se a percentagem de água de amassadura relativamente à Argamassa 1.

5.2.2.4. Tempo de vida útil

Através dos resultados obtidos neste ensaio foi possível verificar que a argamassa industrial tem trabalhabilidade adequada durante mais tempo do que a argamassa tradicional facilitando assim a sua aplicação. Neste ensaio, a argamassa industrial demorou mais tempo a atingir a resistência à penetração de $0,5 \text{ kN/mm}^2$ que a argamassa tradicional. Segundo dados do fabricante, o tempo de vida útil médio da argamassa industrial é de $1200 \pm 140 \text{ min}$.

Ao desmoldar os provetes dos diferentes ensaios era notória a diferença de rigidez nas primeiras idades dos provetes. Em alguns ensaios, nomeadamente o da retração, foi necessário repetir o fabrico dos provetes de argamassa industrial uma vez que ao serem desmoldados degradavam-se ficando inviabilizados para o ensaio.

5.2.3. PRODUTO ENDURECIDO

5.2.3.1. Resistência mecânica

As resistências mecânicas, com particular ênfase a resistência à compressão, são parâmetros relevantes no estudo de argamassas.

Resistência à flexão

A classe de resistência à flexão de argamassas de renovação não se encontra normalizado, no entanto, esta característica foi alvo de estudo para comparar a resistência à flexão entre a argamassa tradicional e a argamassa industrial.

Aos 7 dias, a resistência à flexão de ambas as argamassas foi nula. Aos 28 dias, a argamassa tradicional possuía em média, uma resistência à flexão de 0,48 MPa com um desvio padrão de 0,02 e a argamassa industrial possuía, em média, uma resistência à flexão de 0,81 MPa com um desvio padrão de 0,05. Aos 60 dias a argamassa tradicional possuía em média uma resistência à flexão de 0,67 MPa com um desvio padrão de 0,06 e a argamassa industrial possuía em média uma resistência à flexão de 1,23 MPa com um desvio padrão de 0,06. Aos 90 dias a argamassa tradicional tinha em média, uma resistência à flexão de 0,70 MPa com um desvio padrão de 0,00 e a argamassa industrial de 0,74 MPa com um desvio padrão de 0,02.

Na Tabela 5.3 é possível verificar a evolução da resistência à flexão das argamassas comparativamente aos 28 dias de idade. Na argamassa industrial é possível verificar um aumento em cerca de 52% de resistência aos 28 dias de idade, no entanto, aos 90 dias de idade houve uma diminuição acentuada da resistência à flexão, sendo inferior em 9% comparativamente à resistência aos 28 dias de idade. Quanto à argamassa tradicional foi possível verificar o aumento gradual de resistência à flexão, onde aos 60 dias aumentou 40% e aos 90 dias aumentou 47%, comparativamente aos 28 dias de idade.

Tabela 5.3 - Evolução da resistência à flexão das argamassas

Idade	Argamassa industrial	Desempenho	Argamassa tradicional	Desempenho
28	0,81	-	0,48	
60	1,23	52%	0,67	40%
90	0,74	-9%	0,70	47%

Resistência à compressão

As argamassas em estudo pertencem à categoria CS II da resistência à compressão, segundo a NP EN 998-1:2013, Quadro 1 e 2, que deve estar compreendida entre 1,5 e 5,0 N/mm², após os 28 dias, não existindo qualquer especificação para os valores de resistência aos 7, 60 e 90 dias.

Aos 7 dias, na argamassa tradicional, os valores obtidos na resistência à compressão foram ligeiramente superiores aos obtidos para a argamassa industrial, com valores médios de resistência de 0,21 MPa e 0,18 MPa e desvio padrão de 0,02 e 0,01 respetivamente. Aos 28 dias, a argamassa tradicional possuía uma resistência à compressão que não cumpria o requisito especificado pela NP EN 998-1:2013 com um valor médio de resistência à compressão de 1,05 MPa e um desvio padrão de 0,02, enquanto que a argamassa industrial cumpria o requisito para a resistência à compressão especificado na norma com um valor médio de resistência de 1,48 MPa e um desvio padrão de 0,05.

Como se pode observar na Tabela 5.4 aos 60 dias obteve-se um valor médio de resistência à compressão de 1,76 MPa com um desvio padrão de 0,10 verificando-se um incremento de resistência na argamassa industrial de 19% e na argamassa tradicional obteve-se um valor médio de resistência à compressão de 1,08 MPa, com um desvio padrão de 0,14, tendo-se verificado um incremento de resistência de 3%. Aos 90 dias obteve-se um valor médio na resistência à compressão de 1,31 MPa na

argamassa industrial, com um desvio padrão de 0,04, sofrendo um decréscimo de resistência de 11%. Quanto à argamassa tradicional o valor médio obtido na resistência à compressão foi de 1,26 MPa, com um desvio padrão de 0,00, tendo um incremento de resistência de 20%, comparativamente aos 28 dias de idade.

Tabela 5.4 - Evolução da resistência à compressão das argamassas

Idade	Argamassa industrial	Desempenho	Argamassa tradicional	Desempenho
28	1,48	-	1,05	
60	1,76	19%	1,08	3%
90	1,31	-11%	1,26	20%

5.2.3.2. Massa volúmica do produto endurecido e condutibilidade térmica

O valor declarado pelo fabricante nos rebocos pré-doseados constitui uma exigência importante para a especificação em projeto. A massa volúmica do produto endurecido, M_{pe} , deve ser limitada para rebocos aplicados em suportes de resistência mecânica mais fraca ($M_{pe} < 1400 \text{ kg/m}^3$) ou muito absorventes ($M_{pe} < 1600 \text{ kg/m}^3$), Gonçalves e Margarido (2012).

Os valores da massa volúmica no estado endurecido, segundo a NP EN 998-1:2013, são estabelecidas pelo fabricante.

A Argamassa Industrial em estudo tem o valor declarado de $1400 \pm 100 \text{ kg/m}^3$. O valor obtido médio foi de 1459 kg/m^3 e com um desvio padrão de 13 cumprindo o especificado pelo fabricante. O parâmetro da condutibilidade térmica também está de acordo com o estabelecido pelo fabricante, $0,47 \text{ w} \cdot (\text{m/k})$ para um percentual de população de 50%, conforme NP EN 1745:2005.

Para a argamassa tradicional o valor médio obtido foi de 1814 kg/m^3 com um desvio padrão de 6, valor superior ao obtido na Argamassa Industrial, tal como o valor da condutibilidade térmica que foi de 0,83 para um percentual de população de 50% e 0,93 para um percentual de população de 90%. Esta argamassa não respeita a recomendação de Gonçalves e Margarido (2012), tendo massa volúmica do produto endurecido superior.

5.2.3.3. Módulo de elasticidade

A determinação do módulo de elasticidade de uma argamassa é um ensaio que atualmente não se encontra normalizado. No entanto, este valor encontra-se especificado na ficha do fabricante da argamassa industrial, que indica que o módulo de elasticidade está compreendido entre 2000 e 4000 MPa, e na argamassa tradicional tendo por base o traço recomendado, que indica um valor do módulo de elasticidade de 3300 MPa.

O valor médio do módulo de elasticidade obtido para a argamassa industrial foi de 2060 MPa, com um desvio padrão de 173, que está compreendido no intervalo especificado pelo fabricante.

O valor recomendado pelo fabricante para o ligante de cal hidráulica natural, para traços de 1:3, ligante areia é de 3300 MPa. O valor médio do módulo de elasticidade obtido para a argamassa tradicional, foi de 3840 MPa, com um desvio padrão de 202, um valor próximo do módulo de elasticidade do traço recomendado pelo fabricante. O traço da argamassa tradicional em estudo, como

já referido é de 1:2,2, sendo maior o seu teor em ligante comparativamente ao traço recomendado pelo fabricante. Deste modo, o facto dos resultados obtidos serem superiores aos do traço recomendado pelo fabricante pode dever-se ao teor em ligante superior pois quanto maior o teor em ligante de uma argamassa maior é o seu módulo de elasticidade.

Como referido no ponto 2.5.1 do Capítulo 2, quanto menor o módulo de elasticidade de um material maior a sua capacidade de deformação. As argamassas a usar em revestimentos de edifícios antigos têm que ter resistência mecânica compatível com os suportes e um módulo de elasticidade reduzido para minimizar as tensões devidas a deformações diferenciais na alvenaria de edifícios antigos. Analisando os resultados obtidos verifica-se que a argamassa industrial possui módulo de elasticidade inferior ao da argamassa tradicional, sendo a mais adequada na maioria das aplicações de reabilitação sobre suportes antigos.

5.2.3.4. Aderência a diferentes suportes

A aderência a diferentes suportes é um dos requisitos para as argamassas especificado na NP EN 998-1:2013. Esta norma refere que a tensão de aderência e o padrão de fratura são elementos a especificar pelo fabricante para argamassas de renovação.

A argamassa industrial tem especificado na sua ficha técnica a tensão de aderência superior a 0,2 MPa e o modo de rotura A e B, rotura adesiva ou rotura coesiva pelo reboco, respetivamente. Os resultados obtidos neste ensaio, para a argamassa industrial foram, para a aderência ao tijolo, em média, de 0,33 MPa e o tipo de rotura B e ao bloco 0,42 MPa e o tipo de rotura B.

Os valores obtidos na tensão de aderência de argamassa tradicional ao bloco foram, em média, de 0,20 MPa e modo de rotura do tipo B, inferior aos resultados obtidos para a argamassa industrial. A tensão de aderência ao tijolo foi de 0,42 MPa, resultado superior ao obtido para a argamassa industrial, e tipo de rotura B.

O facto de a argamassa industrial possuir menores valores de tensão de aderência ao tijolo em relação à argamassa tradicional pode ter sido pela presença de introdutores de ar na sua composição, uma vez que estes adjuvantes podem afetar negativamente a aderência, (Gonçalves e Margarido, 2012).

5.2.3.5. Comportamento face à ação da água

Penetração de água e absorção de água por capilaridade

As argamassas de renovação, segundo a NP EN 998-1, devem ter uma absorção de água por capilaridade, para argamassas destinadas a utilização em elementos exteriores, superior a 0,3 kg/m². O valor obtido para a absorção de água por capilaridade, ao fim de 24 horas, na argamassa industrial foi de 2,0 kg/m², no entanto para a argamassa tradicional a absorção de água por capilaridade, ao fim de 24 horas, foi de 8,55 kg/m² mas este valor não corresponde ao valor real uma vez que o provete teve absorção total de água, que assim será superior.

Os resultados obtidos refletem que a argamassa industrial tem melhor comportamento, no que diz respeito à absorção de água por capilaridade, comparativamente à argamassa tradicional. A água não penetrou pelo centro do provete devido à existência de hidrófugos na constituição da argamassa industrial.

Esta característica é de grande importância uma vez que o reboco é uma camada protetora do suporte. O facto de este ser hidrofugado impede a entrada de água no seu interior e, consequentemente, que

esta chegue ao suporte evitando a sua degradação devido à presença de água e saís que esta possa eventualmente transportar.

No que diz respeito à profundidade de penetração de água após o ensaio de absorção de água por capilaridade, a EN NP 998-1:2013 especifica que, para as mesmas argamassas, deve ser inferior a 5 mm. Na argamassa industrial, como foi referido no ponto 3.2.3.5 do Capítulo 3, a profundidade de penetração de água é quase nula uma vez que esta se deu pelas faces seladas dos provetes e em alguns casos em toda a sua extensão, não se dando pelo interior. A argamassa tradicional, uma vez que houve absorção total de água por parte do provete, não cumpriu este requisito.

Permeabilidade ao vapor

A EN NP 998-1:2013 especifica que o coeficiente de permeabilidade ao vapor, para argamassas de renovação, deve ser inferior a 15.

O valor médio obtido na argamassa industrial foi de 4,58 e na tradicional foi de 5,97, cumprindo ambas o requisito especificado na norma.

Neste ensaio, observou-se que a argamassa industrial tem maior permeabilidade ao vapor uma vez que o coeficiente de permeabilidade ao vapor obtido é inferior ao da argamassa tradicional. O coeficiente é traduzido pelo inverso da permeabilidade ao vapor, afetados pelo fator de permeabilidade ao vapor de água para uma temperatura de 20 °C e pressão atmosférica de 101325 Pa. Como tal, quanto menor este coeficiente melhor é o comportamento da argamassa no que diz respeito à permeabilidade ao vapor, uma vez que para as argamassas de renovação é importante que as mesmas possuam alta permeabilidade ao vapor, permitindo ao reboco libertar a água proveniente das paredes, através da sua evaporação.

Porosidade acessível à água

A porosidade acessível à água de uma argamassa é um ensaio que não se encontra normalizado não existindo valores estipulados a cumprir pela norma e, também, especificados pelo fabricante. Como tal apenas foi possível comparar os resultados obtidos entre as argamassas.

Através do ensaio realizado constatou-se que a argamassa industrial tem 34,4% de volume de poros acessível à água e a argamassa tradicional 29,2%. A argamassa industrial tem o volume de poros acessível à água superior em cerca de 15% relativamente à argamassa tradicional.

Este fator será provocado, possivelmente, pelos aditivos que a argamassa industrial possui, nomeadamente introdutores de ar. Este aditivo aumenta o número de poros existente na argamassa, distribuindo-os de modo homogéneo.

Tendo em conta os resultados obtidos nos ensaios de comportamento face à água foi possível concluir que a argamassa industrial tem maior porosidade e uma rede porosa mais interligada. Esta interligação entre poros encontra-se protegida por hidrófugos, que repelem a passagem de água líquida, uma vez que esta argamassa permite a passagem de vapor mas não permite a passagem de água como sucede com a argamassa tradicional.

5.2.3.6. Características após ciclos de gelo/degelo

Com o ensaio de resistência ao gelo/degelo foi possível avaliar a evolução da massa volúmica, do modo de elasticidade, das resistências mecânicas e da tensão de aderência ao tijolo após os ciclos.

Os provetes de argamassa industrial, não se degradaram visivelmente com os ciclos de gelo/degelo devido, à presença de hidrófugos, que impedem a entrada de água no provete, e à presença de introdutores de ar, que permitem a existência de pequenos poros que podem acomodar o aumento de volume da água provocado pela congelação sem danificar a estrutura interna do provete.

Pelo contrário, os provetes de argamassa tradicional deram sinais de degradação ao fim de 3 ciclos de gelo/degelo. Uma vez que a porosidade deste material é menor, como constatado nos ensaios de comportamento face à água, a água ao sofrer o aumento de volume provocado pela congelação fissurou a estrutura interna do provete fragilizando-o. Além disto, esta argamassa possui elevada absorção de água e os provetes encontravam-se saturados quando foram submetidos ao ciclo de degelo. Com maiores quantidades de água no seu interior, maior eram os danos provocados pela ação da água ao congelar.

No entanto, há que referir que os provetes sujeitos a 2 ciclos de gelo/degelo não tiveram as mesmas condições de transporte que os provetes que foram sujeitos a mais ciclos. Os provetes que sofreram mais ciclos foram transportados quando já se encontravam em cura ao ar sendo transportados devidamente protegidos. Os provetes que foram sujeitos a 2 ciclos estavam em cura em água sendo transportados dentro de um recipiente com água sem proteção aos choques. Além disto não foi possível repetir o ensaio devido à avaria do equipamento.

Massa volúmica

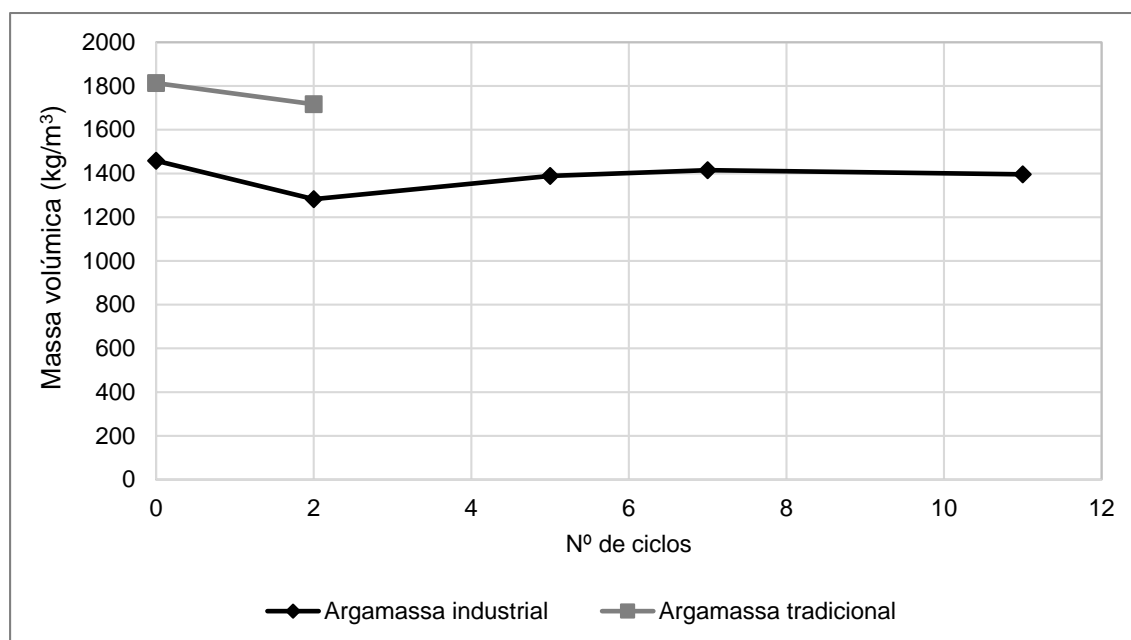


Figura 5.1 - Evolução da massa volúmica ao longo dos ciclos de gelo/degelo

A massa volúmica dos provetes de argamassa industrial manteve-se constante ao longo dos ciclos, como se pode ver na Figura 5.1. Não se verificou perda de material nem danos visíveis nos provetes estando os resultados obtidos de acordo com o que se observou durante o procedimento.

Quanto aos provetes de argamassa tradicional verificou-se uma descida da massa volúmica após 2 ciclos de gelo degelo, essencialmente por perda de material que foi bem visível durante o procedimento. Não foi possível estudar a evolução da massa volúmica ao longo de mais ciclos pois os provetes degradaram-se ao fim de 5 ciclos, não permitindo o estudo da massa volúmica e do módulo de elasticidade.

Módulo de elasticidade

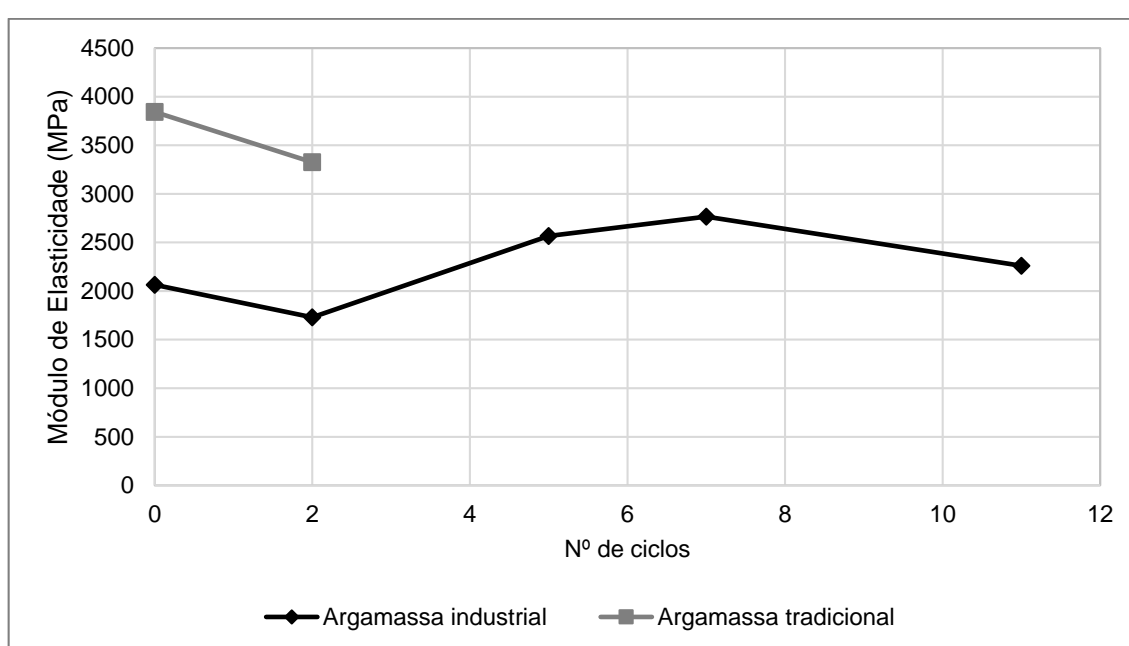


Figura 5.2 - Evolução do módulo de elasticidade após ciclos de gelo/degelo

Na argamassa industrial, até aos 7 ciclos de gelo/degelo, houve um aumento do módulo de elasticidade dos provetes, como se pode ver no gráfico da Figura 5.2. Este aumento pode dever-se ao facto de o ciclo de degelo incluir a imersão do provete em água. Esta imersão pode ter favorecido o processo de cura hidráulica dos provetes, aumentando os compostos de silicatos e aluminatos hidratados e portanto o módulo de elasticidade.

Na argamassa tradicional apenas foi possível medir o módulo de elasticidade ao fim de 2 ciclos de gelo/degelo, ocorrendo um decréscimo no seu módulo de elasticidade.

Neste capítulo foi avaliada a evolução do desempenho dos provetes ao longo dos ciclos de gelo/degelo. O desempenho foi calculado através da seguinte expressão:

$$\text{Desempenho (\%)} = \frac{V_i - V_f}{V_f} \quad (5.1)$$

Onde o V_i é o valor antes de os provetes estarem sujeitos aos ciclos e V_f é o valor após os provetes estarem sujeitos aos ciclos.

Resistências mecânicas

Os resultados obtidos foram comparados com os resultados obtidos nas argamassas com 28 dias de idade.

Resistência à flexão

Tabela 5.5 - Evolução da resistência à flexão em MPa durante os ciclos de gelo/degelo

Ciclos	Argamassa industrial	Desempenho	Desvio padrão	Argamassa tradicional	Desempenho	Desvio padrão
0	0,81	-	-	0,48	-	-
2	0,31	-62%	0,01	0,00	-100%	0,00
5	0,60	-26%	0,06	N.R.	-	-
7	0,60	-26%	0,02	N.R.	-	-
11	0,55	-32%	0,00	N.R.	-	-

⁽¹⁾ Os provetes ao fim de 5 ciclos degradaram-se por completo ficando inviáveis para ensaio

Na argamassa tradicional foi possível observar a ação destrutiva dos ciclos de gelo/degelo nos provetes. Os provetes sujeitos a 2 ciclos de gelo/degelo não possuíam qualquer resistência à flexão.

Na argamassa industrial foi possível observar a diminuição da resistência à flexão ao longo dos ciclos, como se pode observar na Tabela 5.5.

Resistência à compressão

Tabela 5.6 - Evolução da resistência à compressão em MPa durante os ciclos de gelo/degelo

Ciclos	Argamassa industrial	Desempenho	Desvio padrão	Argamassa tradicional	Desempenho	Desvio padrão
0	1,48	-	-	1,05	-	-
2	0,46	-69%	0,03	0,57	-46%	0,06
5	0,80	-46%	0,05	0,59	-44%	0,09
7	0,78	-47%	0,02	(1)	-	-
11	0,78	-47%	0,10	(1)	-	-

⁽¹⁾ Os provetes ao fim de 5 ciclos degradaram-se por completo ficando inviáveis para ensaio

Apesar dos provetes de argamassa tradicional degradarem-se ao fim de 5 ciclos, foi possível avaliar a sua resistência à compressão. Os valores obtidos, que se encontram na Tabela 5.6, são superiores aos dos provetes sujeitos a apenas 2 ciclos de gelo/degelo, como era de esperar. Estes ciclos degradaram a estrutura interna dos provetes originando perda de resistência.

A argamassa industrial, apesar de visivelmente não se observar sinais de degradação com os ciclos de gelo/degelo teve uma quebra de resistência próxima dos 50% por degradação da estrutura interna dos provetes.

Aderência ao tijolo

Tabela 5.7 - Evolução da tensão de aderência após os ciclos de gelo/degelo

Tipo de Argamassa		Tensão (MPa)	Tipo de rotura
Industrial	Antes de ciclo gelo/degelo	0,33	B
	Após ciclo gelo/degelo	0,48	B
	Desempenho	44%	
Tradicional	Antes de ciclo gelo/degelo	0,42	B
	Após ciclo gelo/degelo	0,60	A,B
	Desempenho	41%	

Ambas as argamassas sofreram um incremento de tensão de aderência após 5 ciclos de gelo/degelo revelando que estes provetes não se degradaram com os ciclos, como se pode ver na Tabela 5.7. Com base em estudos de outros autores, nomeadamente Santos, Frade e Pereira (2014), este aumento poderá estar associado ao processo de cura uma vez que estes provetes não ficam imersos em água, sendo a componente de cura húmida apenas quando permanecem na câmara de conservação de provetes à temperatura de 20 ± 2 °C e a $95 \pm 5\%$ de humidade relativa. O facto de o processo de degelo ser dentro de água poderá ter dado continuação à hidratação do ligante aumentando assim a sua tensão de aderência.

O tipo de rotura nos provetes de argamassa industrial, após os ciclos, foi coesiva pelo reboco e na argamassa tradicional ocorreram dois tipos de rotura, rotura entre a interface do reboco e do suporte, ou seja, rotura adesiva e também rotura coesiva pelo reboco como se pode ver na Figura 3.76 do Capítulo 3.

A rotura adesiva no caso da argamassa tradicional pode ter ocorrido devido à fragilização da ligação entre a argamassa e o suporte provocada pelo aumento de volume após a congelação da água.

5.2.3.7. Retração

A evolução da retração foi significativa nos primeiros 10 dias dos provetes, tanto na argamassa tradicional como na argamassa industrial. A evolução da retração nos primeiros dias foi mais notória na argamassa industrial atingindo valores de retração superiores aos da argamassa tradicional em cerca de 18,3%.

A retração nos provetes de argamassa tradicional após os 20 dias de idade não é significativa, como se pode ver na Figura 5.3.

Após os 18 dias de idade dos provetes da argamassa industrial, os valores da retração têm vindo a estabilizar, sendo superiores aos da argamassa tradicional.

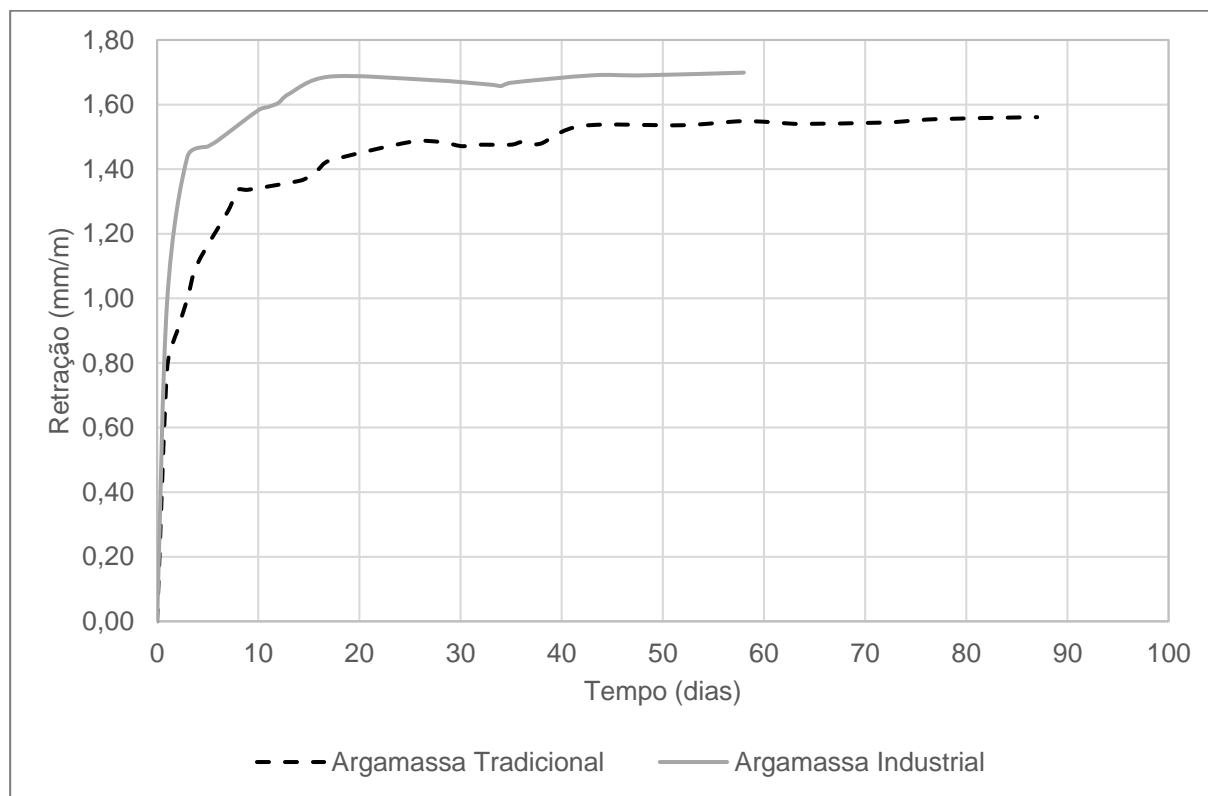


Figura 5.3 - Resultados obtidos no ensaio de retração

Os resultados obtidos no ensaio de retração, nas primeiras idades dos provetes de ambas as argamassas poderão estar influenciados devido à fragilidade dos provetes. Ao ajustar os *insert* no micrómetro, para medir a retração sofrida pela argamassa, estes podem ter sido empurrados para dentro do provete e, assim, os resultados obtidos não serem viáveis para a avaliação da retração inicial das argamassas. No entanto é de realçar que a retração é maior na argamassa industrial, comparativamente com a argamassa tradicional. Isto pode dever-se ao facto de a argamassa industrial depois de ser desmoldada e nos dias seguintes ser mais deformável que a tradicional.

Deste modo, constatou-se que o método utilizado na avaliação da retração não se adequa às argamassas em estudo devendo-se averiguar um método menos agressivo para os provetes.

5.3. NOVOS DESENVOLVIMENTOS

5.3.1. RESISTIVIDADE

Como consequência das diferentes condições de ensaio onde foram realizadas as medições, os resultados obtidos foram muito diferentes, como foi possível constatar no capítulo anterior.

Como referido no capítulo anterior, durante a avaliação da resistividade foi necessário adaptar os procedimentos utilizados e assim produzir provetes durante as sucessivas fases de investigação, que se descrevem novamente em seguida:

- Série 1: Resistividade a partir dos 31 dias, de provetes com 28 dias de processo de cura e posteriormente saturados e mantidos imersos a desde os 29 dias (Medição com redes a 5 mm dos topos na argamassa tradicional e à face na industrial).
- Série 2: Resistividade ao longo do processo de cura de provetes com rede metálica embebida a 5 mm dos topos (provetes de argamassa industrial inviabilizados)
- Série 3: Resistividade aos 8 dias (período de cura). Medição com placas metálicas Resistividade ao longo da cura dos provetes.

Na Figura 5.4 apresentam-se os resultados conjuntos das três séries. Os resultados obtidos na série 1 evidenciam a evolução da resistividade mesmo após o processo de cura, como se pode observar. Contudo é importante referir que os provetes foram saturados aos 29 dias e permaneceram em imersão numa solução saturada de hidróxido de cálcio, podendo esta evolução estar associada à continuidade do processo de hidratação dos silicatos e aluminatos ainda não hidratados da cal.

Os resultados obtidos para a série 2, que acompanha a evolução da resistividade ao longo do processo de cura dos provetes de argamassa tradicional, mostraram que a evolução da resistividade durante o processo de cura hidráulica tem um crescimento acentuado sendo o declive da reta entre os dois pontos de 0,1094, muito superior ao da reta por regressão obtida após a saturação da mesma amostra aos 29 dias, que foi de 0,0133 como seria de esperar. Após o processo de cura de 28 dias e posterior saturação dos provetes a evolução da resistividade não foi tão acentuada, como se poderia prever, como se pode verificar na Figura 5.4. Recorde-se que os provetes de argamassa industrial degradaram-se na primeira leitura e não foi possível avaliar a evolução da resistividade durante o processo de cura (série 2).

Note-se que não será legítimo comparar estas duas funções lineares dos dois conjuntos de dados (um até aos 6 dias e outro depois da cura e saturados aos 29 dias). Na realidade estes dados poderão ser considerados de amostras diferentes.

As retas obtidas por regressão linear dos dois tipos de argamassa após a saturação apresentam inclinações semelhantes.

Como se pode observar na Figura 5.4, quanto à série 3, em que a avaliação de resistividade se realizou com placas, foi possível confirmar que a resistividade da argamassa tradicional é superior à da argamassa industrial. No entanto, o valor da resistividade para a argamassa tradicional observado nesta série é cerca do dobro do valor correspondente da série 1, muito provavelmente devido à influência do procedimento de medição incluir placas em vez de redes.

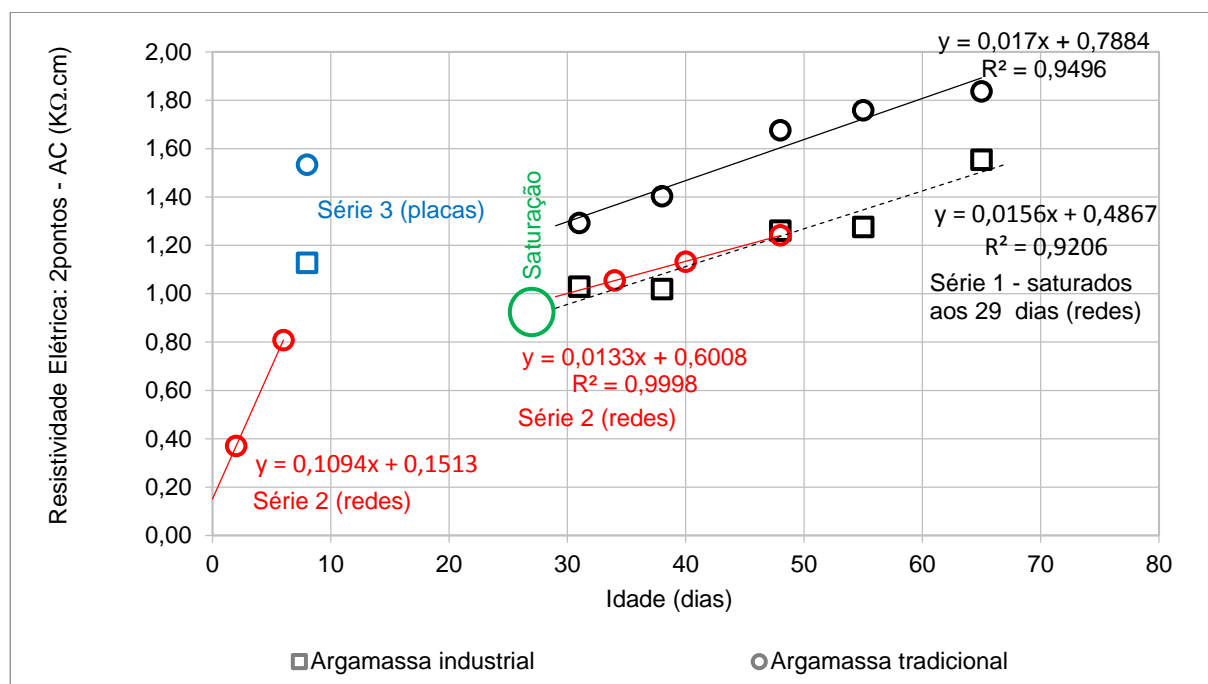


Figura 5.4 - Resultados conjuntos da resistividade

Como conclusão destes ensaios de resistividade poder-se-á dizer que comparando os resultados obtidos, mesmo sob condições diferentes de ensaio, verificou-se que a argamassa industrial obteve sempre valores inferiores de resistividade em relação à argamassa tradicional.

Através de bibliografia que relaciona a porosidade com a resistividade, referido no Capítulo 2, verifica-se que este ensaio poderá eventualmente dar indicações sobre a porosidade de uma argamassa pois a argamassa industrial é mais porosa e com poros mais interligados do que a argamassa tradicional conduzindo assim a valores de resistividade inferior.

Este ensaio, no futuro, poderá ser um indicador fiável da porosidade nas argamassas, em especial nos primeiros dias, uma vez que é possível a medição da resistividade nas primeiras idades dos provetes sem estes se degradarem.

Como se verificou ao longo do estudo da resistividade, quando a argamassa perde demasiada humidade já não é possível avaliar a grandeza. No entanto, volta a ser possível medir a resistividade se os provetes forem saturados.

Será necessário ter em conta que ao saturar um provete de argamassa de cal hidráulica poder-se-á estar a alterar a rede porosa do mesmo, em constante evolução nesta fase, não só porque a saturação poderá ser agressiva mas também porque, após a saturação, está-se a interferir no processo natural de endurecimento da argamassa de cal hidráulica, que nesta fase será ao ar, por recarbonatação do hidróxido de cálcio (e não pela hidratação forçada dos silicatos e aluminatos de cálcio).

Sendo assim, quando se pretende medir a resistividade a determinada idade, t dias, a partir de cerca de 14 dias em que a humidade natural da argamassa já não é suficiente, poderá ser mais realista e fidedigno, saturar os provetes de argamassa e avaliar a resistividade aos t dias e não mais utilizar esses provetes. Assim, o ensaio seria um ensaio destrutivo e para avaliar a evolução da resistividade ao longo do tempo ($t > 14$ dias) seria necessário produzir provetes para cada idade.

5.3.2. RESISTÊNCIA AOS SAIS – CLORETOS

Este ensaio, como referido anteriormente, é um ensaio característico do betão. Até à data não se encontram referências deste ensaio realizado em provetes de argamassa à base de cal hidráulica natural.

Os provetes experimentais mostraram resistir ao procedimento de colocação nas células. Estes não ficaram degradados devido à colocação de fita-cola à sua volta. Deste modo, verificou-se que a aplicação de fita-cola nos provetes revelou-se um procedimento eficaz na proteção dos mesmos às agressões provocadas pelas células, recomendando-se a sua utilização sempre que se realizar este ensaio em argamassas à base de cal.

Outra questão que merece destaque é a utilização de fita-cola quando o provete não possui as dimensões corretas devido à troca dos moldes no fabrico dos provetes. Esta mostrou ter bom comportamento durante o ensaio não permitindo a passagem de solução por entre as várias camadas enquanto permanecia nas células.

Através dos provetes experimentais constatou-se que a diferença de potencial utilizada no betão não é aplicável nos provetes de argamassa à base de cal hidráulica natural recomendando-se valores inferiores aos utilizados em provetes de betão.

Para efetuar o corte dos provetes a serragem dos mesmos foi eficaz, no entanto, constatou-se alguma degradação dos provetes e dificuldades durante o processo de serragem devido à areia.

Relativamente aos provetes finais, os resultados obtidos mostraram que a argamassa tradicional tem maior profundidade de penetração de cloretos que a argamassa industrial.

Quando se mediu a profundidade de penetração de cloretos na argamassa industrial constatou-se que os provetes possuíam duas frentes de penetração. Isto ocorreu uma vez que o reservatório catódico fora montado ao contrário, sendo a face não cofrada aquela por onde os cloretos penetraram. Este acontecimento proporcionou, provavelmente, uma profundidade de penetração de cloretos maior na argamassa industrial do que a que se iria obter caso os provetes estivessem corretamente colocados nos reservatórios catódicos, tendo por base o referido por Coutinho (2005) sobre as diferenças de resistência entre a face cofrada e a face não cofrada.

Este ensaio não é fiel ao que acontece na realidade uma vez que as argamassas de revestimento nunca se encontram completamente saturadas. No entanto, é um parâmetro importante a avaliar no tipo de argamassas em estudo. Tendo em conta que são argamassas de revestimento encontram-se muitas vezes sujeitas a ciclos de cristalização e recristalização de sais, levando à degradação da estrutura interna do material. Quanto menor for a profundidade de penetração dos cloretos neste material melhor ele se irá comportar durante as sucessivas cristalizações e recristalizações dos sais, pois menor é a profundidade que estes atingem no reboco.

Uma vez que o modelo de difusão de cloretos em que se baseia o cálculo do coeficiente de difusão referido na E 463 foi estabelecido para o betão, optou-se por apenas apresentar como resultados as profundidades de penetração de cloretos.

5.3.3. REATIVIDADE ALCALIS-SÍLICA

Através da utilização de provetes experimentais, constatou-se que a temperatura utilizada neste ensaio durante o banho-maria em água e posteriormente em NaOH, em argamassas cimentícias, é muito elevada para aplicar nos provetes de argamassa à base de cal hidráulica natural. Deste modo, em vez

de usar a temperatura de 80 °C, adaptou-se a temperatura do banho-maria para 20 °C. Esta adaptação mostrou-se importante uma vez que os provetes resistiram ao procedimento e foi possível obter resultados significativos durante o ensaio.

O molde utilizado na fabricação de provetes para o ensaio de resistência à ação dos sulfatos revelou-se um método eficaz na produção de provetes de argamassa de cal para o ensaio de reatividade potencial aos álcalis pois, apesar das suas dimensões, os provetes resistiram ao processo de desmoldagem.

Segundo a especificação E 461 do LNEC existem três classes de reatividade, Classe I (agregado não reativo), Classe II (agregado potencialmente reativo) e Classe III (agregado potencialmente reativo), sendo os agregados da Classe III mais reativos do que os da Classe II. Para avaliar a reatividade dos agregados, se a expansão for inferior a 0,10% ao fim de 14 dias o agregado é da Classe I, se estiver entre 0,10% e 0,20% é da Classe II e se for superior a 0,20% é da Classe III.

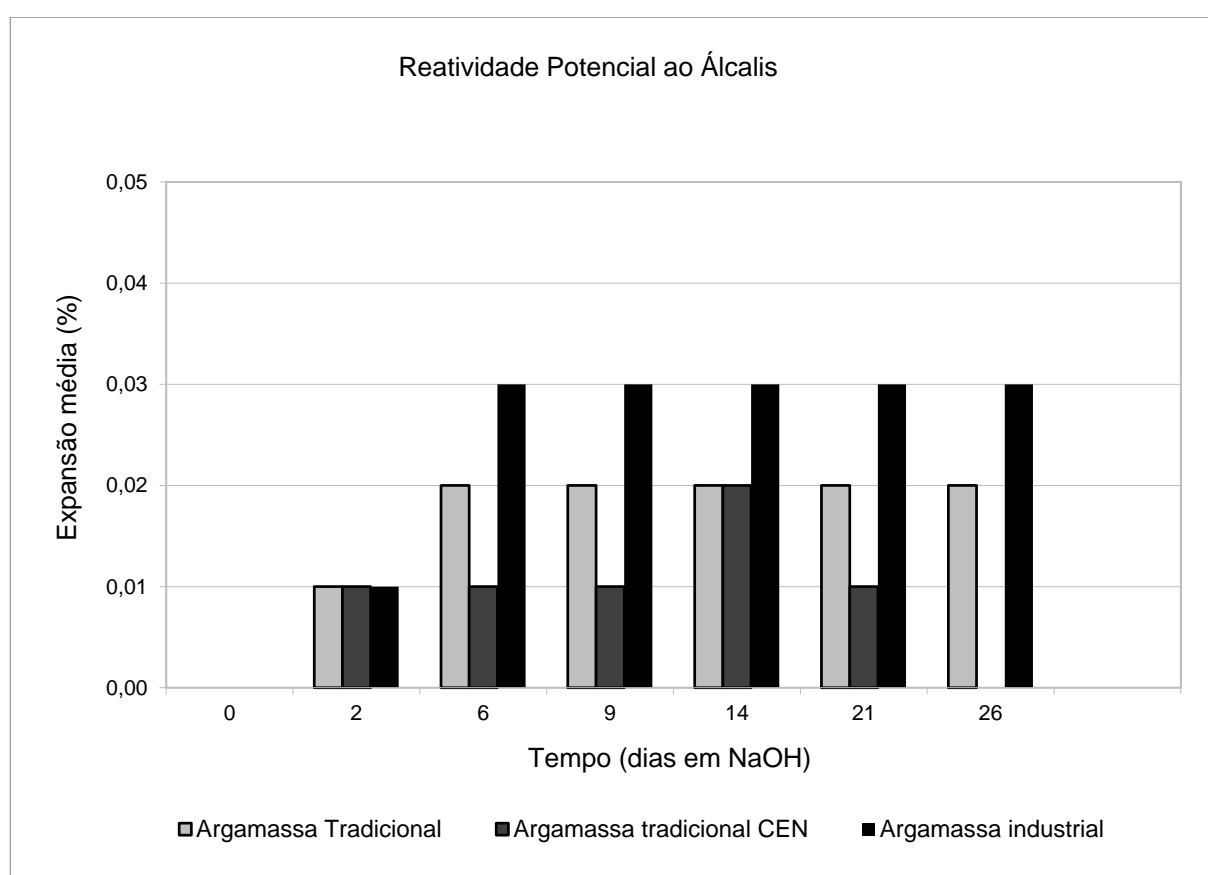


Figura 5.5 - Resultados obtidos no ensaio de reatividade potencial aos álcalis

Devido à diferença das condições de ensaio estes resultados não correspondem a valores comparáveis com o descrito na respetiva especificação.

No entanto, aos 21 dias, verifica-se que a combinação agregado/ligante da argamassa industrial é mais reativa do que a combinação da argamassa tradicional e da combinação da areia reativa/cal hidráulica.

5.4. BIBLIOGRAFIA

Coutinho, J. (2005). *Melhoria da durabilidade dos betões*. Porto: ISBN ISBN 972-752-073-1.

E 461-2007. *Betões metodologias para prevenir reacções expansivas internas*. Lisboa, Portugal. : LNEC. 7 p.-7 p. p.

E 463-2004. *Betões. Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por ensaio de migração em regime não estacionário*. Lisboa, Portugal.: LNEC. 8 p.-8 p. p.

Gonçalves, M.,Margarido, F. (2012). *Ciência e engenharia de materiais de construção*. Lisboa: IST Press. ISBN 978-989-8481-17-7.

NP EN 1745:2005. *Alvenarias e elementos de alvenaria Métodos para determinação de valores térmicos de cálculo*. Lisboa, Portugal.: IPQ. 59 p.-59 p. p.

NP EN 998-1: 2013. *Especificação de argamassas para alvenarias Parte 1: Argamassas para rebocos interiores e exteriores*. Portugal: IPQ. 23 p-23 p p.

Santos, A.,Frade, D.,Pereira, R. (2014). Comportamento de argamassas à base de cal hidráulica natural ao gelo-degelo. In 2014.

6

CONCLUSÕES

6.1. INTRODUÇÃO

No capítulo anterior foram analisadas algumas das propriedades das argamassas em estudo. Como se verificou no capítulo Novos Desenvolvimentos, os procedimentos referentes aos ensaios adaptados do estudo de outros materiais foram alvo de sucessivos aperfeiçoamentos até à sua forma final, apresentando-se as suas conclusões no ponto 6.2.

No ponto 6.3 procedeu-se à comparação entre os resultados obtidos em cada uma das argamassas e averiguou-se também se as suas características respeitavam o estipulado pela normalização em vigor.

Com o objetivo de apurar qual das argamassas melhor se ajusta à reabilitação de revestimentos em edifícios antigos, neste capítulo procedeu-se à comparação entre os resultados obtidos e as recomendações de Paiva, Aguiar e Pinho (2006) e Veiga (2006) descritas no Capítulo 2 ponto 2.5 do presente trabalho e complementarmente, recorreu-se à norma EN NP 998-1:2013, que estabelece os requisitos para argamassas industriais, para aqueles que não são abordados nas recomendações.

No ponto 6.4 sugerem-se os desenvolvimentos futuros a realizar em argamassas à base de cal hidráulica natural para dar continuidade ao trabalho presentemente desenvolvido.

6.2. NOVOS PROCEDIMENTOS DOS ENSAIOS ADAPTADOS

Na realidade, os passos dados na fase Novos Desenvolvimentos do programa permitiu estabelecer uma série de conclusões sobre os procedimentos que permitem com sucesso atingir o objetivo pretendido de avaliação de cada propriedade.

6.2.1. RESISTIVIDADE

- A medição da resistividade com recurso a placas metálicas revelou-se um método eficaz para o ensaio de resistividade. Além disto, os dados obtidos no ensaio revelam um possível método a utilizar na comparação indireta da porosidade entre provetes de argamassa à base de cal hidráulica em idades jovens;
- A medição da resistividade através de provetes de argamassa com rede metálica não deve ser feita após a desmoldagem dos mesmos uma vez que estes ainda se encontram muito frágeis, podendo degradar-se e ficar inviabilizados para o ensaio;
- A perda de humidade na argamassa impossibilita a avaliação da resistividade, contudo através da saturação dos provetes é novamente possível medi-la;
- A saturação dos provetes poderá alterar a sua rede porosa, em constante evolução durante a cura aérea, interferindo com o processo de endurecimento natural da argamassa que nesta fase será ao ar por recarbonatação do hidróxido de cálcio e não pela hidratação forçada dos silicatos e aluminatos de cálcio;

- Para medir a resistividade a determinada idade, t dias, a partir de cerca de 14 dias deverá-se fabricar provetes para a idade que se pretenda estudar, saturar os provetes de argamassa, avaliar a resistividade aos t dias e não voltar a utilizar esses provetes, tornando este ensaio destrutivo.

6.2.2. RESISTÊNCIA AOS SAIS - CLORETOS

- A utilização de provetes experimentais no ensaio de penetração de cloretos revelou-se fundamental para a realização do ensaio nos provetes finais. Os provetes experimentais, devido à utilização do molde errado na sua confecção, mostraram que é possível corrigir as dimensões de provetes com recurso a fita-cola para a sua colocação nas células.
- Os provetes experimentais revelaram que a gama de valores de diferença de potencial utilizada no betão não é aplicável nos provetes de argamassa à base de cal hidráulica natural, recomendando-se valores inferiores aos utilizados em provetes de betão;
- A aplicação de folha de acetato na base e nas laterais do molde utilizado na confecção dos provetes para o ensaio de penetração de cloretos mostrou-se eficaz permitindo a desmoldagem dos provetes sem os degradar;
- No ensaio de penetração de cloretos verificou-se a vantagem da utilização de fita-cola à volta dos provetes de argamassa à base de cal hidráulica natural como método de proteção da sua integridade aquando da montagem nas células;
- Devido à fragilidade dos provetes optou-se por realizar o corte dos provetes (e não abertura por compressão linear), para posterior pulverização com nitrato de prata. Mesmo assim este processo mostrou-se difícil tendo provocado alguma degradação dos provetes.

6.2.3. REATIVIDADE ÁLCALIS-SÍLICA

- Para o ensaio da reatividade álcalis-sílica foi necessário adaptar as condições para as argamassas em estudo. Ao testar a sua aplicabilidade, os provetes de argamassa tradicional resistiram ao procedimento, no entanto, os de argamassa industrial degradaram-se tendo inviabilizado o ensaio.
- As temperaturas a 80 °C em banho-maria de água e da solução de NaOH revelaram-se muito agressivas para os provetes experimentais. A utilização a 20 °C em banho-maria de água e da solução NaOH mostrou-se adequada para a avaliação da evolução da reatividade álcalis-sílica uma vez que os provetes resistiram a este procedimento;
- A utilização do molde para a fabricação dos provetes para o ensaio de resistência à ação dos sulfatos, de dimensões 20 x 20 x 160 mm, na produção de provetes para o ensaio de ASR em argamassas à base de cal hidráulica natural mostrou-se eficaz uma vez que os provetes não se degradaram após a desmoldagem, processo de cura e durante as leituras.

Na Tabela 6.1 encontram-se, de forma resumida, os resultados obtidos nos ensaios de Novos Desenvolvimentos.

Tabela 6.1 - Resumo dos resultados obtidos nos ensaios Novos Desenvolvimentos

Tipo de argamassa	Profundidade de penetração de iões cloretos (mm)	Resistividade (KΩcm)				Reatividade álcalis-silica	
		Série				Expansão (%)	
		28 dias (Cl)	1 – saturados e com redes (31 dias de idade)	2 - redes (14 dias de idade)	3 - placas (8 dias de idade)	14 dias	26 dias
Industrial	8,5	0,97	1,03	(1)	1,13	0,03	0,03
Tradicional	20,2	1,38	1,29	0,81	1,53	0,02	0,02
Tradicional com areia CEN	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	0,02	0,00
Observações	O ensaio permitiu tirar conclusões no entanto os provetes são frágeis para ensaio	-	Valores da resistividade da série 3 influenciados pelo método de medição. Provetes frágeis para medição em idade jovem através da rede metálica			Adaptações do ensaio realizadas com sucesso	

(1) Provetes degradaram-se na primeira leitura

(2) Argamassa formulada apenas para o ensaio ASR

6.3. CONCLUSÕES DOS RESULTADOS OBTIDOS

Na Tabela 6.2 encontra-se resumidamente os resultados obtidos nos diferentes ensaios e a comparação com os requisitos da NP EN 998-1:2013 e recomendações de diferentes autores.

Tabela 6.2 – Resumo dos resultados obtidos no programa experimental

Ensaio Realizados		Resultados obtidos		Requisitos	Observações	
		Argamassa Industrial	Argamassa Tradicional			
Resistências mecânicas (MPa)	Flexão	7 dias	0,00	0,00	N.E.	-
		28 dias	0,81	0,48	0,2 - 0,7	Paiva, Aguiar e Pinho (2006)
		60 dias	1,23	0,67	N.E.	-
		90 dias	0,74	0,70	N.E.	-
		Após 2 ciclos gelo/degelo	0,31	0,00	N.E.	-
		Após 5 ciclos gelo/degelo	0,60	N.R.	N.E.	-
		Após 7 ciclos gelo/degelo	0,60	N.R.	N.E.	-
		Após 11 ciclos gelo/degelo	0,55	N.R.	N.E.	-
	Compressão	7 dias	0,18	0,21	N.E.	-
		28 dias	1,48	1,05	0,4 - 2,5	Paiva, Aguiar e Pinho (2006)
	60 dias	1,76	1,08	N.E.	-	

	90 dias	1,31	1,26	N.E.	-	
	Após 2 ciclos gelo/degelo	0,46	0,57	N.E.	-	
	Após 5 ciclos gelo/degelo	0,80	0,59	N.E.	-	
	Após 7 ciclos gelo/degelo	0,78	N.R.	N.E.	-	
	Após 11 ciclos gelo/degelo	0,78	N.R.	N.E.	-	
Massa volúmica do produto endurecido (kg/m³)		1459	1813	1300 - 1500	EN 998-1	
Massa volúmica do produto endurecido após 2 ciclos de gelo/degelo (kg/m³)		1283	1717	N.E.	-	
Módulo de elasticidade (N/mm²)		2063	3842	2000 - 5000	Paiva, Aguiar e Pinho (2006)	
Módulo de elasticidade após 2 ciclos de gelo/degelo (N/mm²)		1729	3325	N.E.	-	
Comportamento face à água	Capilaridade (24h kg/m²)	2,0	8,6 ⁽¹⁾	≥ 0,3	EN 998-1	
	Profundidade de penetração de água (mm)	0	Absorção total	< 5	EN 998-1	
	Coefficiente de permeabilidade ao vapor	4,58	5,97	≤ 15	EN 998-1	
	Porosidade acessível à água (%)	34,36	29,21	N.E.	-	
Aderência a diferentes suportes	Tijolo	Modo de rotura	Coesiva pelo reboco	Coesiva pelo reboco	Coesiva pelo reboco	Paiva, Aguiar e Pinho (2006)
		Tensão (MPa)	0,33	0,42	0,1 - 0,3	Paiva, Aguiar e Pinho (2006)
	Tijolo após gelo/degelo	Modo de rotura	Coesiva pelo reboco	Rotura adesiva, Coesiva pelo reboco	N.E.	-
		Tensão (MPa)	0,48	0,60	N.E.	-
	Bloco	Modo de rotura	Coesiva pelo reboco	Coesiva pelo reboco	Coesiva pelo reboco	Paiva, Aguiar e Pinho (2006)
		Tensão (MPa)	0,42	0,20	0,1 - 0,3	Paiva, Aguiar e Pinho (2006)

Legenda:

Cumpre

Não Cumpre

NR - Não realizado

N.E. - Não especificado

(1) Não corresponde ao valor real uma vez que o provete teve absorção total de água

Numa abordagem geral foi possível obter algumas conclusões dos resultados obtidos no presente trabalho.

Através dos ensaios do produto em pasta foi possível verificar que a argamassa industrial apresenta melhor trabalhabilidade durante mais tempo, facilitando a sua aplicação, comparativamente à argamassa tradicional.

Os ensaios realizados para o estudo do comportamento das argamassas face à ação da água permitiram concluir que a argamassa industrial apresenta melhor desempenho. Esta argamassa, comparativamente com a tradicional, tem maior porosidade acessível à água e permeabilidade ao vapor, por outro lado,

tem menor absorção de água por capilaridade. Apesar de a argamassa industrial possuir uma rede porosa mais interligada, a presença de hidrófugos na sua composição fez com que a estrutura porosa esteja protegida da ação da água.

A argamassa industrial apresenta menores valores de massa volúmica. Apesar de não ter sido verificada a relação entre a massa volúmica e a porosidade acessível à água referida por Sequeira et al. (2012), exposta no ponto 2.5.1 do Capítulo 2, verificou-se que para uma maior massa volúmica do produto endurecido menor é a sua porosidade acessível à água.

Na argamassa industrial, nos diversos métodos utilizados para a medição da resistividade, obtiveram-se valores inferiores aos da argamassa tradicional. O facto de a argamassa industrial apresentar valores inferiores aos da tradicional pode ser explicado pela relação exposta por Lencioni e Lima (2010) para betão, onde se refere que a porosidade como um fator que altera a resistividade, podendo neste caso haver uma relação entre a porosidade e a resistividade. Este ensaio pode ser um indicador da porosidade de uma argamassa, realçando a sua utilidade na aplicação em provetes que ainda não completaram o seu processo de cura. No entanto, surge a importância de dar continuidade ao estudo desta relação em argamassas de cal.

Contudo, o facto de a argamassa industrial ser mais porosa do que a tradicional não significou valores de resistências mecânicas inferiores, pelo contrário. A argamassa industrial possui valores ligeiramente superiores de resistência mecânica comparativamente à argamassa tradicional.

No que diz respeito à aderência a diferentes suportes, concluiu-se que a utilização de adjuvantes para conferir maior porosidade à argamassa industrial influenciou o seu desempenho nesta propriedade. A argamassa industrial possui menor tensão de aderência ao suporte comparativamente com a argamassa tradicional.

A argamassa industrial é mais resistente aos ciclos de gelo/degelo que a argamassa tradicional. Além de ser mais difícil o acesso da água por ação do hidrófugo, a existência de uma estrutura porosa mais eficiente permitiu que a água que entrou nos provetes ao congelar pudesse aumentar de volume sem provocar tensões internas no provete, degradando-os.

Outro fator importante na durabilidade das argamassas de revestimento é a resistência à penetração de sais, estudada no presente trabalho através de ensaios de novos desenvolvimentos. Pelo ensaio de profundidade de penetração dos cloretos verificou-se que a argamassa industrial é mais resistente à penetração de sais cloretos do que a argamassa tradicional. Este fator é um bom indicador de durabilidade de argamassas de revestimento pois evidencia uma menor suscetibilidade da argamassa industrial face às ações provocadas pelas sucessivas cristalizações e recristalizações.

O procedimento utilizado para a avaliação da retração não era o adequado para as argamassas em estudo, uma vez que os resultados obtidos nas primeiras idades podem ter sido influenciados pela fragilidade das argamassas em idades jovens.

A reatividade ao álcali-sílica, como exposto no Capítulo 2 ponto 2.3.1 por Nero (2015), não será um problema significativo para argamassas à base de cal hidráulica natural em virtude da reduzida quantidade de álcalis presente. No entanto, verificou-se uma reatividade ligeiramente superior nas argamassas industriais em comparação com as argamassas tradicionais estudadas.

6.4. CONCLUSÕES FINAIS

No presente trabalho foi possível adaptar os ensaios utilizados no estudo da durabilidade do betão para argamassas à base de cal hidráulica natural, nomeadamente a resistividade, a penetração de iões cloretos

e a reatividade ao álcali-sílica. É importante referir que através das adaptações, realizadas ao longo do programa, estes ensaios foram realizados com sucesso e foi possível retirar conclusões importantes dos mesmos.

Em relação ao ensaio de penetração de iões cloretos a argamassa industrial não permite uma penetração tão acentuada como a argamassa tradicional, sendo mais resistente à penetração destes iões. No que diz respeito ao ensaio da resistividade, os valores obtidos permitiram verificar a relação entre a resistividade e a porosidade, quanto maior a porosidade menor a resistividade de uma argamassa. Seria de esperar que para argamassas com menor valor de resistividade maior fosse a profundidade de penetração de cloretos. No entanto tal não sucedeu. A resistividade e a profundidade de penetração de cloretos menor, na argamassa industrial comparativamente com a tradicional, poderá ser explicada pela hidrofugação da argamassa industrial. Esta ao ser mais porosa atinge valores menores de resistividade, no entanto, devido à hidrofugação não permitira que a solução aquosa de iões penetre na argamassa e estes se difundam para o interior, levando assim a valores menores de profundidade de penetração de cloretos

Relativamente ao ensaio álcali-sílica verificou-se que, após adaptação do procedimento, é possível realizar este ensaio em argamassas à base de cal hidráulica natural tendo-se concluído que a expansão é ligeiramente superior mas da mesma ordem de grandeza que as restantes argamassas estudadas.

Também foi possível verificar as vantagens do uso do tipo de argamassas industriais utilizado, nomeadamente no que diz respeito à durabilidade, em relação às argamassas tradicionais em estudo. O uso destas, além de se adequarem às exigências na reabilitação de revestimentos de edifícios antigos, são mais resistentes às agressões do meio, em especial à ação da água.

6.5. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

O estudo de argamassas à base de cal hidráulica natural deve ser aprofundado. Conhecido o valor deste ligante na reabilitação surge a importância de conhecer melhor as suas propriedades e questões ligadas à durabilidade. Além disto, é de realçar a importância na realização e normalização de ensaios relacionados com a durabilidade. Como tal, seguem-se algumas questões a abordar em desenvolvimentos futuros na investigação de argamassas à base de cal hidráulica, bem como, alguns desenvolvimentos relativos a ensaios importantes na avaliação da durabilidade das argamassas de revestimento:

- Estudar as diferentes camadas de argamassas que compõe o revestimento de edifícios antigos, nomeadamente a camada de consolidação e acabamento;
- Analisar diferentes composições de traços de argamassas com o objetivo de averiguar qual a relação entre a dimensão das areias e o teor em ligante na durabilidade de uma argamassa;
- Repetir o ensaio de retração, adaptando o procedimento para o tipo de argamassas em estudo;
- Realizar o ensaio de porosímetro de mercúrio em argamassas à base de cal hidráulica natural, que não foi possível fazer no presente trabalho;
- Repetir o método dos cloretos uma vez que a colocação dos provetes finais nas células de ensaio degradou-os e os provetes de argamassa industrial foram colocados ao contrário nas células;
- Explorar o ensaio da resistividade no estudo da porosidade de argamassas à base de cal hidráulica natural, nomeadamente transformando-o num ensaio destrutivo. Realizar 3 provetes de dimensões 40 x 40 x 160 mm e medir a resistividade com recurso a placas metálicas para cada idade que se pretenda estudar, saturando os provetes e medindo a resistividade não se reutilizando o mesmo provete neste procedimento. Recomenda-se a

avaliação da resistividade, pelo menos, aos 7, 14, 21 e 28 dias, saturando sempre os provetes para as condições de ensaio permanecerem constantes.

- Prolongar os ciclos de gelo e degelo para avaliar a sua influência na aderência a diferentes suportes e a variação ao longo dos ciclos, uma vez que os ciclos aplicados nos provetes incrementaram a tensão de aderência devido à hidratação do ligante;

6.6. BIBLIOGRAFIA

NP EN 998-1: 2013. *Especificação de argamassas para alvenarias Parte 1: Argamassas para rebocos interiores e exteriores*. Portugal: IPQ. 23 p-23 p p.

Lencioni, J., Lima, M. (2010). Principais fatores intervenientes nas medidas de resistividade elétrica superficial do concreto – Estado-da-Arte. In *VI Congresso internacional sobre patologia e reabilitação de estruturas*. Brasil: 2010.

Nero, J. (2015). Uma reflexão sobre a prescrição de argamassas de revestimento no nosso edificado. *Anteprojectos*,

Paiva, J. V., Aguiar, J., Pinho, A. (2006). *Guia técnico de reabilitação habitacional*. Lisboa: Instituto Nacional de Habitação. ISBN 972-49-2081-X.

Sequeira, C., Santos, A., Frade, D., Gonçalves, P. (2012). Análise de diferentes ligantes na formulação de argamassas industriais de reabilitação. In *4º Congresso Nacional de Argamassas de Construção. PATORREB 2012*. Santiago de Compostela, Espanha: 2012.

Veiga, M. (2006). *Comportamento de rebocos para edifícios antigos: exigências gerais e requisitos específicos para edifícios antigos*. Lisboa: LNEC. ISBN 972-49-2063-1.

ANEXOS

ANEXO A
Espalhamento das
argamassas

Espalhamento					
Amostra	Diametro 1 (mm)	Diametro 2 (mm)	Diametro 2 (mm)	Diametro 2 (mm)	Espalhamento (mm)
Argamassa Industrial	153,7	152,1	151,8	154,6	153,1
Argamassa 1	149,8	147,4	151,3	150,2	149,7
Argamassa 1*	117,8	116,9	117,5	115,4	116,9
Argamassa 2	149,1	147,8	147,5	147,9	148,1
Argamassa 3	150,3	153,5	150	150,6	151,1
Argamassa 4	145,4	148	147,5	145,4	146,6

*possui menor percentagem de água de amassadura

ANEXO B

Massa volúmica das argamassas e Massa volúmica das argamassas depois dos ciclos gelo/degelo

Massa Volúmica da Argamassa Industrial aos 28 dias					
	I	II	III	Valor Médio	Desvio padrão
mp.seco (g)	374,4	369,8	376,0	373	
d _{ap} (kg/m ³)	1463	1444	1469	1459	13
Massa Volúmica da Argamassa Tradicional aos 28 dias					
	I	II	III	Valor Médio	Desvio padrão
mp.seco (g)	462,5	464,7	465,5	464	
d _{ap} (kg/m ³)	1807	1815	1818	1813	6
Massa Volúmica da Argamassa Industrial após ciclos de gelo/degelo					
	I	II	III	Valor Médio	
2 ciclos	mp.seco (g)	329,2	328,8	327,3	328
	d _{ap} (kg/m ³)	1286	1284	1279	1283
5 ciclos	mp.seco (g)	344,6	366,1	355,8	356
	d _{ap} (kg/m ³)	1346	1430	1390	1389
7 ciclos	mp.seco (g)	363,4	357,9	365,5	362
	d _{ap} (kg/m ³)	1419	1398	1428	1415
11 ciclos	mp.seco (g)	346,2	368,6		357
	d _{ap} (kg/m ³)	1352	1440		1396
Massa Volúmica da Argamassa Tradicional após ciclos de gelo/degelo					
	I	II	III	Valor Médio	
2 ciclos	mp.seco (g)	435,1	440,4	443,2	440
	d _{ap} (kg/m ³)	1699	1720	1731	1717

ANEXO C

Módulo de elasticidade das argamassas e Módulo de elasticidade das argamassas depois dos ciclos gelo/degelo

Módulo de Elasticidade da Argamassa Tradicional aos 28 dias (MPa)					
	I	II	III	Valor Médio	Desvio padrão
t (µs)	109,7	105,5	104,7	107	
M.E. (MPa)	3612	3924	3991	3842	202
Módulo de Elasticidade da Argamassa Industrial aos 28 dias (MPa)					
	I	II	III	Valor Médio	Desvio padrão
t (µs)	135,7	130,9	125,3	131	
M.E. (MPa)	1911	2028	2251	2063	173
Módulo de Elasticidade da Argamassa Industrial após ciclos de gelo/degelo					
	I	II	III	Valor Médio	
2 ciclos	t (µs)	130,4	131,9	139,0	134
	M.E. (MPa)	1819	1776	1592	1729
5 ciclos	t (µs)	118,1	112,4	112,2	114
	M.E. (MPa)	2322	2723	2656	2567
7 ciclos	t (µs)	111,7	108,0	113,3	111
	M.E. (MPa)	2737	2883	2676	2765
11 ciclos	t (µs)	123,6	120,4		122
	M.E. (MPa)	2130	2389		2259
Módulo de Elasticidade da Argamassa Tradicional após ciclos de gelo/degelo					
	I	II	III	Valor Médio	
2 ciclos	t (µs)	120,9	111,4	104,1	112
	M.E. (MPa)	2797	3335	3844	3325

ANEXO D

Resistências mecânicas da argamassa industrial nas diferentes idades e após ciclos de gelo/degelo

Resistência à flexão da Argamassa Industrial					
Idade	Resultados Obtidos			Valor Médio	Desvio padrão
2 dias	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7 dias	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
28 dias	0,78	0,86	0,79	0,81	0,05
60 dias	1,20	1,20	1,30	1,23	0,06
90n dias	0,72	0,76	0,74	0,74	0,02

Resistência à compressão da Argamassa Industrial					
Idade	Resultados obtidos			Valor Médio	Desvio padrão
2 dias	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00	0,00		
7 dias	0,17	0,17	0,20	0,18	0,01
	0,17	0,17	0,20		
28 dias	1,51	1,40	1,51	1,48	0,05
	1,43	1,52	1,49		
60 dias	1,89	1,80	1,61	1,76	0,10
	1,82	1,72	1,70		
90 dias	1,31	1,29	1,30	1,31	0,04
	1,37	1,27	1,34		

Resistência à flexão da Argamassa Industrial após ciclos de gelo/degelo					
Número de ciclos	Resultados Obtidos			Valor Médio	Desvio padrão
2	0,30	0,31	0,32	0,31	0,01
5	0,57	0,57	0,67	0,60	0,06
7	0,58	0,61	0,61	0,60	0,02
11	0,55			0,55	

Resistência à compressão da Argamassa Industrial após ciclos de gelo/degelo					
Número de ciclos	Resultados Obtidos			Valor Médio	Desvio padrão
2	0,47	0,44	0,50	0,46	0,03
	0,48	0,44	0,43		
5	0,77	0,89	0,81	0,80	0,05
	0,76	0,79	N.R.		
7	0,78	0,76	0,81	0,78	0,02
	0,80	0,77	0,78		
11	0,67	0,79	0,87	0,78	0,10

ANEXO E

Resistências mecânicas da argamassa tradicional nas diferentes idades e após ciclos de gelo/degelo

Resistência à flexão da Argamassa Tradicional					
Idade	Resultados Obtidos			Valor Médio	Desvio padrão
2 dias	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7 dias	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
28 dias	0,45	0,47	0,50	0,48	0,02
60 dias	0,70	0,60	0,70	0,67	0,06
90 dias	0,70	0,70	0,70	0,70	0,00

Resistência à compressão para Argamassa Tradicional					
Idade	Resultados Obtidos			Valor Médio	Desvio padrão
2 dias	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00	0,00		
7 dias	0,22	0,19	0,24	0,21	0,02
	0,19	0,20	0,23		
28 dias	0,82	1,14	1,23	1,05	0,15
	0,94	1,13	1,03		
60 dias	1,12	1,16	1,04	1,08	0,14
	1,21	0,82	1,13		
90 dias	1,45	1,48	0,94	1,26	0,21
	1,27	1,30	1,11		

Resistência à flexão da Argamassa Tradicional após ciclos de gelo/degelo					
Número de ciclos	Resultados Obtidos			Valor Médio	Desvio padrão
2	0,00	0,00	0	0,00	0
5	N.R.	N.R.	N.R.	N.R.	
7	N.R.	N.R.	N.R.	N.R.	
11	N.R.	N.R.	N.R.	N.R.	

Resistência à compressão da Argamassa Tradicional após ciclos de gelo/degelo					
Número de ciclos	Resultados Obtidos			Valor Médio	Desvio padrão
2	0,53	0,56	0,57	0,57	0,06
	0,62	0,47	0,66		
5	0,68	0,48	0,57	0,59	0,09
	0,67	0,51	0,64		
7	N.R.	N.R.	N.R.	N.R.	
	N.R.	N.R.	N.R.		

ANEXO F

Retração da argamassa industrial

Idade		0	1	3	5	6	10	11	12	13
Provete I	L_t (mm)	0,250	0,113	0,027	0,022	0,022	-0,010	-0,008	-0,011	-0,008
	m (g)	379,68	352,00	330,80	330,49	330,56	330,30	330,35	330,26	330,20
	E_t (mm/m)	0,000	0,855	1,392	1,423	1,423	1,622	1,610	1,629	1,610
	Δm (%)	0,00	7,86	14,78	14,88	14,86	14,95	14,93	14,96	14,98
Provete II	L_t (mm)	0,239	0,048	-0,023	-0,027	-0,027	-0,046	-0,048	-0,051	-0,054
	m (g)	379,68	354,70	332,87	332,35	332,39	332,22	332,26	332,20	332,10
	E_t (mm/m)	0,000	1,192	1,635	1,660	1,660	1,779	1,791	1,810	1,829
	Δm (%)	0,00	7,04	14,06	14,24	14,23	14,29	14,27	14,29	14,33
Provete II	L_t (mm)	0,464	0,314	0,257	0,251	0,242	0,248	0,243	0,243	0,230
	m (g)	375,72	349,20	328,48	328,16	328,20	328,10	328,15	328,05	328,20
	E_t (mm/m)	0,000	0,935	1,290	1,327	1,383	1,346	1,377	1,377	1,458
	Δm (%)	0,00	7,59	14,38	14,49	14,48	14,51	14,50	14,53	14,48
	E_t (mm/m)	0,000	0,994	1,439	1,470	1,489	1,582	1,593	1,605	1,632
	Δm (%)	0,00	7,50	14,41	14,54	14,52	14,58	14,57	14,60	14,60

Idade		17	27	33	34	35	43	48	58
Provete I	L_t (mm)	-0,021	-0,020	-0,017	-0,014	-0,017	-0,022	-0,022	-0,023
	m (g)	330,26	330,18	330,08	330,05	329,98	329,88	329,84	329,86
	E_t (mm/m)	1,691	1,685	1,666	1,647	1,666	1,697	1,697	1,704
	Δm (%)	14,96	14,99	15,03	15,04	15,06	15,10	15,11	15,10
Provete II	L_t (mm)	-0,061	-0,060	-0,061	-0,060	-0,062	-0,064	-0,065	-0,069
	m (g)	332,15	332,07	331,99	331,96	331,89	331,80	331,79	331,80
	E_t (mm/m)	1,872	1,866	1,872	1,866	1,878	1,891	1,897	1,922
	Δm (%)	14,31	14,34	14,36	14,38	14,40	14,43	14,43	14,43
Provete II	L_t (mm)	0,224	0,227	0,232	0,230	0,230	0,226	0,227	0,228
	m (g)	328,08	328,00	327,98	327,98	327,91	327,83	327,82	327,82
	E_t (mm/m)	1,496	1,477	1,446	1,458	1,458	1,483	1,477	1,471
	Δm (%)	14,52	14,55	14,56	14,56	14,58	14,61	14,61	14,61
	E_t (mm/m)	1,686	1,676	1,661	1,657	1,668	1,690	1,690	1,699
	Δm (%)	14,60	14,63	14,65	14,66	14,68	14,71	14,72	14,72

ANEXO G

Retração da argamassa tradicional

Idade		0	1	2	3	4	7	8	9	14	15	16	17	25	28	30
Provete I	L _t (mm)	0,145	0,018	-0,005	-0,018	-0,032	-0,050	-0,054	-0,055	-0,061	-0,061	-0,061	-0,064	-0,071	-0,074	-0,073
	m (g)	522,93	504,11	486,45	478,09	475,65	474,23	474,31	474,48	475,23	475,38	475,14	475,50	475,85	476,18	476,36
	E _t (mm/m)	0,000	0,793	0,937	1,018	1,105	1,218	1,243	1,249	1,286	1,286	1,286	1,305	1,349	1,368	1,361
	Δ m (%)	0,00	3,73	7,50	9,38	9,94	10,27	10,25	10,21	10,04	10,00	10,06	9,97	9,89	9,82	9,78
Provete II	L _t (mm)	0,198	0,079	0,053	0,048	0,039	0,000	-0,010	-0,010	-0,013	-0,016	-0,020	-0,026	-0,038	-0,038	-0,035
	m (g)	520,79	504,28	489,26	477,75	474,18	471,98	472,00	472,12	472,79	472,93	472,67	473,05	473,42	473,78	473,96
	E _t (mm/m)	0,000	0,743	0,905	0,936	0,993	1,236	1,298	1,298	1,317	1,336	1,361	1,398	1,473	1,473	1,454
	Δ m (%)	0,00	3,27	6,44	9,01	9,83	10,34	10,34	10,31	10,15	10,12	10,18	10,09	10,01	9,92	9,88
Provete III	L _t (mm)	0,129	-0,002	-0,008	-0,038	-0,067	-0,088	-0,106	-0,105	-0,109	-0,112	-0,120	-0,123	-0,132	-0,129	-0,127
	m (g)	519,86	502,35	486,19	475,99	473,31	471,55	471,64	471,71	472,39	472,48	472,21	472,61	472,99	473,26	473,46
	E _t (mm/m)	0,000	0,818	0,856	1,043	1,224	1,355	1,468	1,461	1,486	1,505	1,555	1,574	1,630	1,611	1,599
	Δ m (%)	0,00	3,49	6,93	9,22	9,83	10,24	10,22	10,21	10,05	10,03	10,09	10,00	9,91	9,85	9,80
	E _t (mm/m)	0,000	0,785	0,899	0,999	1,107	1,270	1,336	1,336	1,363	1,376	1,401	1,426	1,484	1,484	1,471
	Δ m (%)	0,00	3,50	6,96	9,20	9,87	10,29	10,27	10,24	10,08	10,05	10,11	10,02	9,94	9,86	9,82

Idade		31	32	35	36	37	38	42	52	58	63	64	72	77	87
Provete I	L _t (mm)	-0,072	-0,072	-0,073	-0,075	-0,076	-0,076	-0,083	-0,084	-0,089	-0,088	-0,087	-0,087	-0,088	-0,089
	m (g)	476,52	476,54	476,90	476,93	476,96	477,00	477,32	477,93	478,25	478,37	478,33	478,63	478,72	479,08
	E _t (mm/m)	1,355	1,355	1,361	1,374	1,380	1,380	1,424	1,430	1,461	1,455	1,449	1,449	1,455	1,461
	Δ m (%)	9,74	9,73	9,65	9,65	9,64	9,63	9,56	9,42	9,34	9,31	9,32	9,26	9,24	9,15
Provete II	L _t (mm)	-0,035	-0,034	-0,035	-0,035	-0,033	-0,034	-0,041	-0,041	-0,042	-0,042	-0,042	-0,043	-0,044	-0,046
	m (g)	474,15	474,14	474,40	474,52	474,55	474,70	474,98	475,22	475,89	476,05	476,05	476,39	476,49	476,83
	E _t (mm/m)	1,454	1,448	1,454	1,454	1,442	1,448	1,492	1,492	1,498	1,498	1,498	1,504	1,511	1,523
	Δ m (%)	9,84	9,84	9,78	9,75	9,74	9,71	9,64	9,59	9,43	9,40	9,40	9,32	9,30	9,22
Provete III	L _t (mm)	-0,129	-0,131	-0,129	-0,131	-0,129	-0,129	-0,141	-0,141	-0,141	-0,138	-0,139	-0,140	-0,143	-0,143
	m (g)	473,63	473,58	474,00	474,05	474,08	474,20	474,42	474,79	475,27	475,45	475,43	475,76	475,88	476,18
	E _t (mm/m)	1,611	1,624	1,611	1,624	1,611	1,611	1,686	1,686	1,686	1,667	1,674	1,680	1,699	1,699
	Δ m (%)	9,76	9,77	9,68	9,66	9,66	9,63	9,58	9,49	9,38	9,34	9,35	9,27	9,24	9,17
	E _t (mm/m)	1,474	1,476	1,476	1,484	1,478	1,480	1,534	1,536	1,548	1,540	1,540	1,544	1,555	1,561
	Δ m (%)	9,78	9,78	9,70	9,69	9,68	9,66	9,59	9,50	9,39	9,35	9,36	9,28	9,26	9,18

ANEXO H

Aderência a diferentes suportes da argamassa industrial

Tijolo		Secção			Tensão (MPa)	Rotura	Observações
Carote	Força (kN)	Tipo	Med	mm2			
1	0,60	CIRC	50	1963,5	0,31	B	
2	0,53	CIRC	50	1963,5	0,27	B	
3	0,67	CIRC	50	1963,5	0,34	A,B	40%a+60%b
4	0,80	CIRC	50	1963,5	0,41	B	

Bloco		Secção			Tensão (MPa)	Rotura	Observações
Carote	Força (kN)	Tipo	Med	mm2			
1	0,67	CIRC	50	1963,5	0,34	B	
2	0,73	CIRC	50	1963,5	0,37	B	
3	0,93	CIRC	50	1963,5	0,47	B	
4	0,93	CIRC	50	1963,5	0,47	B	

	Tijolo		Bloco
Tensão (MPa)	0,33	Tensão (MPa)	0,42
Tipo de rotura	b	Tipo de rotura	b

Tijolo após ciclo de gelo/degelo

		Secção			Tensão (MPa)	Rotura	Observações
Carote	Força (kN)	Tipo	Med	mm2			
1	1,00	CIRC	50	1963,5	0,51	B	
2	0,87	CIRC	50	1963,5	0,44	B	
3	0,93	CIRC	50	1963,5	0,47	A	
4	0,93	CIRC	50	1963,5	0,47	A,B	40% A, 60% B

	Tijolo
Tensão (MPa)	0,47
Tipo de rotura	B

ANEXO I

Aderência a diferentes suportes da argamassa tradicional

Tijolo		Secção			Tensão (MPa)	Rotura	Observações
Carote	Força (kN)	Tipo	Med	mm2			
1	0,73	CIRC	50	1963,5	0,37	B	
2	0,73	CIRC	50	1963,5	0,37	B	
3	0,87	CIRC	50	1963,5	0,44	B	
4	1,00	CIRC	50	1963,5	0,51	B	

Bloco		Secção			Tensão (MPa)	Rotura	Observações
Carote	Força (kN)	Tipo	Med	mm2			
1	0,33	CIRC	50	1963,5	0,17	B	
2	0,40	CIRC	50	1963,5	0,20	B	
3	0,40	CIRC	50	1963,5	0,20	B	
4	0,47	CIRC	50	1963,5	0,24	B	

	Tijolo		Bloco
Tensão (MPa)	0,42	Tensão (MPa)	0,20
Tipo de rotura	b	Tipo de rotura	b

Tijolo após ciclo de gelo/degelo

		Secção			Tensão (MPa)	Rotura	Observações
Carote	Força (kN)	Tipo	Med	mm2			
1	0,87	CIRC	50	1963,5	0,44	A	
2	1,13	CIRC	50	1963,5	0,58	A	
3	1,53	CIRC	50	1963,5	0,78	A,B	
4	1,27	CIRC	50	1963,5	0,65	A,B	

	Tijolo
Tensão (MPa)	0,60
Tipo de rotura	A,B

ANEXO J

Absorção por capilaridade

Argamassa industrial

	Provete 1	Provete 2	Provete 3	Provete 4	Provete 5	Provete 6
Peso 10' (g)	185,11	173,55	185,25	184,04	193,91	176,56
Peso 90' (g)	185,9	174,4	186	184,7	195	177,3
Peso 1440' (g)	188,63	177,42	188,22	186,32	197,72	179,41
Índ. Cap.	0,079	0,085	0,075	0,066	0,109	0,074
	0,10	0,10	0,10	0,05	0,10	0,05
Abs. por Cap. (24h)	2,20	2,42	1,86	1,43	2,38	1,78
	2,20	2,40	1,85	1,45	2,40	1,80

Capilaridade (kg/m²*min^{1/2})
0,10

Abs. por Cap. 24h (kg/m²)
2

Argamassa tradicional

	Provete 1	Provete 2	Provete 3	Provete 4	Provete 5	Provete 6
Peso 10' (g)	225,3	276	279	230,1	241,6	266,7
Peso 90' (g)	235,6	292	295	240,9	254,5	281
Peso 1440' (g)	235,6	292,5	295,4	241,2	254,6	281,4
Índ. Cap.	1,03	1,6	1,6	1,08	1,29	1,43
	1,05	1,60	1,60	1,10	1,30	1,45
Abs. por Cap. (24h)	6,44	10,31	10,25	6,94	8,13	9,19
	6,45	10,30	10,25	6,95	8,15	9,20

Capilaridade (kg/m²*min^{1/2})
1,40

Abs. por Cap. 24h (kg/m²)
8,55

ANEXO L

Porosidade acessível à água

Tipo de Argamassa	M.submerso (g)	Massa do cesto (g)	M.ar	M.seco (g)			e(%)
				1.ª pesagem	2.ª pesagem (24 h)	Δ (%) < 0.05	
Tradicional	118,686	59,964	109,372	94,801	94,800	0,001	28,770
	120,696	60,027	113,379	97,709	97,703	0,006	29,740
	121,350	60,012	114,334	98,940	98,903	0,037	29,117
Industrial	110,131	60,045	102,934	84,653	84,642	0,013	34,61
	110,690	60,028	103,72	86,200	86,186	0,016	33,05
	111,173	60,055	104,44	85,572	85,559	0,015	35,41

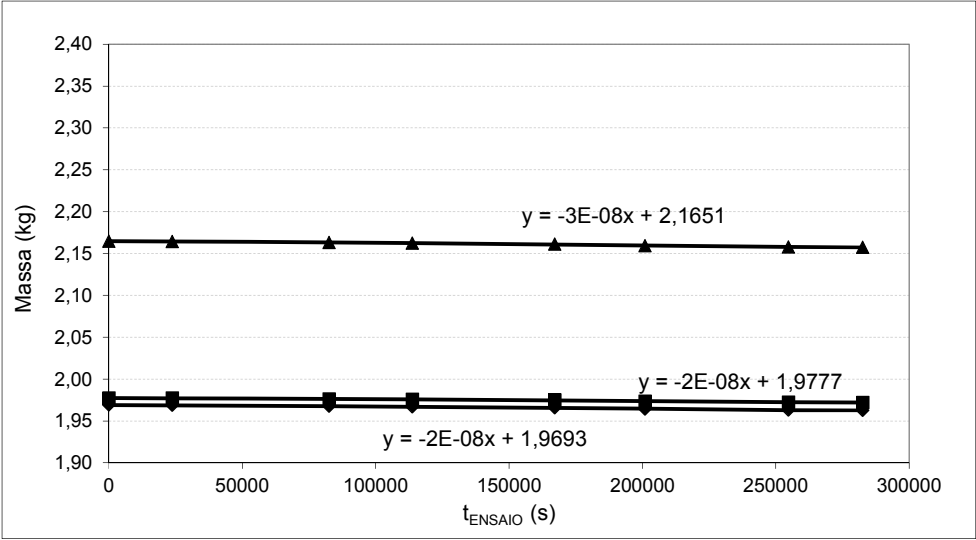
Tipo de Argamassa	e _{médio} (%)	Desvio padrão	Coef. variação (%)
Tradicional	29,21	0,49	1,68
Industrial	34,36	1,20	3,49

ANEXO M
Permeabilidade ao vapor da argamassa industrial

Características da câmara					PROVETE I		PROVETE II		PROVETE III	
t_{ENSAIO}					Massa I		Massa II		Massa III	
T (°C)	Hr (%)	Pv (hPa)	(min)	(s)	(g)	(kg)	(g)	(kg)	(g)	(kg)
20,2	65,63	15,72	0	0	1968,99	1,9690	1977,32	1,9773	2164,68	2,16
20,49	65,04	15,87	395	23700	1968,70	1,9687	1977,15	1,9772	2164,33	2,16
20,08	66,32	15,77	1375	82500	1967,47	1,9675	1976,14	1,9761	2163,06	2,16
20,5	66,11	16,14	1895	113700	1966,90	1,9669	1975,67	1,9757	2162,33	2,16
20,32	64,37	15,74	2785	167100	1965,88	1,9659	1974,82	1,9748	2161,07	2,16
20,59	69,61	17,09	3350	201000	1964,33	1,9643	1973,38	1,9734	2159,26	2,16
21,21	64,19	16,37	4245	254700	1963,02	1,9630	1972,25	1,9723	2157,77	2,16
20,45	64,61	15,72	4710	282600	1962,71	1,9627	1972,00	1,9720	2157,21	2,16

Condições de Ensaio

ΔP (Pa) 600,11



A (m ²)	A (m ²)	A (m ²)
0,02	0,02	0,02
$\delta M/\delta t$ (kg/s)	$\delta M/\delta t$ (kg/s)	$\delta M/\delta t$ (kg/s)
2,00E-08	2,00E-08	3,00E-08
ε (m)	ε (m)	ε (m)
0,021	0,021	0,020
R_A (Pa.m ² .s.kg ⁻¹)	R_A (Pa.m ² .s.kg ⁻¹)	R_A (Pa.m ² .s.kg ⁻¹)
4,80E+07	4,80E+07	4,80E+07
Λ (Kg/Pa.m ² .s)	Λ (Kg/Pa.m ² .s)	Λ (Kg/Pa.m ² .s)
1,8112E-09	1,8149E-09	2,8403E-09
Π (Kg/Pa.m.s)	Π (Kg/Pa.m.s)	Π (Kg/Pa.m.s)
3,7577E-11	3,7495E-11	5,6911E-11
μ	μ	μ
5,16	5,17	3,41
μ médio	4,58	

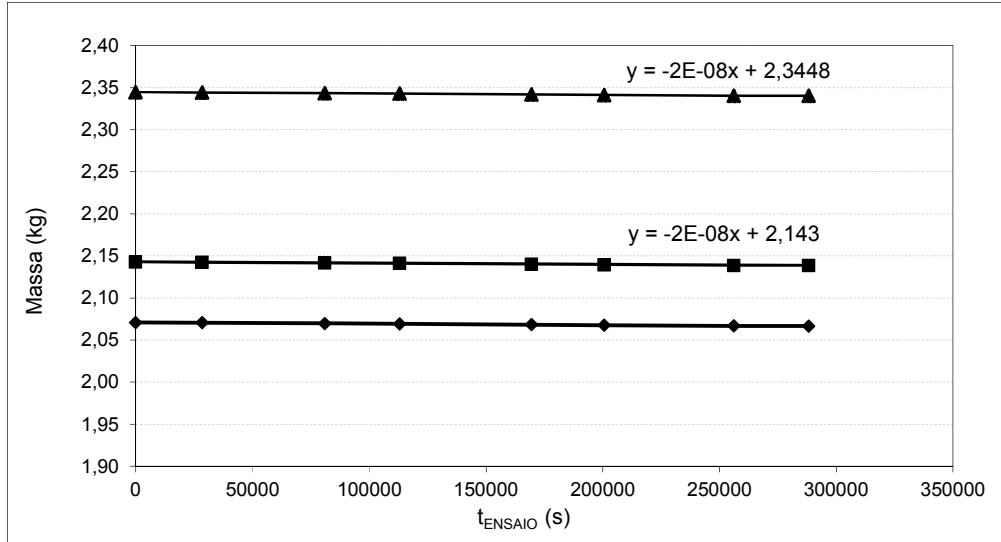
ANEXO N

Permeabilidade ao vapor da argamassa tradicional

					PROVETE I		PROVETE II		PROVETE III	
					Massa I		Massa II		Massa III	
T (°C)	Hr (%)	Pv (hPa)	(min)	(s)	(g)	(kg)	(g)	(kg)	(g)	(kg)
21,06	63,1	15,99	0	0	2070,89	2,0709	2142,94	2,1429	2344,70	2,34
21,03	56,39	14,29	475	28500	2070,60	2,0706	2142,66	2,1427	2344,34	2,34
21,31	59,9	15,42	1350	81000	2069,77	2,0698	2141,80	2,1418	2343,50	2,34
21,08	60,3	15,31	1885	113100	2069,28	2,0693	2141,35	2,1414	2343,02	2,34
20,87	58,61	14,7	2825	169500	2068,42	2,0684	2140,52	2,1405	2342,13	2,34
20,97	60,52	15,26	3345	200700	2067,55	2,0676	2139,65	2,1397	2341,20	2,34
20,62	59,88	14,79	4270	256200	2066,82	2,0668	2138,93	2,1389	2340,38	2,34
20,74	63,72	15,83	4805	288300	2066,69	2,0667	2138,88	2,1389	2340,36	2,34

Condições de Ensaio

ΔP (Pa) 685,483



A (m ²)	A (m ²)	A (m ²)
0,02	0,02	0,02
$\delta M/\delta t$ (kg/s)	$\delta M/\delta t$ (kg/s)	$\delta M/\delta t$ (kg/s)
2,00E-08	1,52E-08	3,00E-08
ε (m)	ε (m)	ε (m)
0,020	0,022	0,020
P_A (Pa.m ² .s.kg ⁻¹)	P_A (Pa.m ² .s.kg ⁻¹)	P_A (Pa.m ² .s.kg ⁻¹)
4,80E+07	4,80E+07	4,80E+07
Λ (Kg/Pa.m ² .s)	Λ (Kg/Pa.m ² .s)	Λ (Kg/Pa.m ² .s)
1,5687E-09	1,1738E-09	2,4451E-09
Π (Kg/Pa.m.s)	Π (Kg/Pa.m.s)	Π (Kg/Pa.m.s)
3,1143E-11	2,5240E-11	4,8706E-11
μ	μ	μ
6,23	7,69	3,98
μ médio		5,97

ANEXO O
ASR da argamassa industrial

Dia	Provete	Expansão (%)	Expansão média (%)
0	A	0,00	0,00
	B	0,00	
	C	0,00	
2	A	0,02	0,01
	B	0,01	
	C	0,01	
6	A	0,03	0,03
	B	0,02	
	C	0,04	
9	A	0,03	0,03
	B	0,02	
	C	0,03	
14	A	0,03	0,03
	B	0,02	
	C	0,02	
21	A	0,03	0,03
	B	0,02	
	C	0,02	
26	A		
	B		
	C		

ANEXO P
ASR da argamassa tradicional com
areia CEN

Dia	Provete	Expansão (%)	Expansão média (%)
0	A	0,00	0,00
	B	0,00	
	C	0,00	
	D	0,00	
2	A	0,01	0,01
	B	0,00	
	C	0,01	
	D	0,01	
6	A	0,02	0,01
	B	0,01	
	C	0,01	
	D	0,01	
9	A	0,02	0,01
	B	0,01	
	C	0,01	
	D	0,02	
14	A	0,02	0,02
	B	0,01	
	C	0,02	
	D	0,02	
21	A	0,02	0,01
	B	0,01	
	C	0,01	
	D	0,01	
26	A		
	B		
	C		
	D		

ANEXO Q
ASR da argamassa tradicional

Dia	Provete	Expansão (%)	Expansão média (%)
0	A	0,00	0,00
	B	0,00	
	C	0,00	
	D	0,00	
2	A	0,00	0,01
	B	0,02	
	C	0,02	
	D	0,01	
6	A	0,01	0,02
	B	0,02	
	C	0,02	
	D	0,01	
9	A	0,02	0,02
	B	0,03	
	C	0,02	
	D	0,01	
14	A	0,02	0,02
	B	0,03	
	C	0,02	
	D	0,01	
21	A	0,02	0,02
	B	0,03	
	C	0,02	
	D	0,00	
26	A		
	B		
	C		
	D		

ANEXO R

Resistividade - série 1

Dados dos provetes de argamassa industrial:

	1	2
l (m)	0,16	0,16
rede 1 (m ²)	0,039	0,039
rede 2 (m ²)	0,038	0,038

Dados dos provetes de argamassa tradicional:

	1	2	3
l (m)	0,14697	0,14323	0,14381
rede 1 (m ²)	0,03834	0,03966	0,0392
rede 2 (m ²)	0,03828	0,03907	0,03951

Idade (dias)		Argamassa tradicional			Argamassa industrial	
		1	2	3	1	2
31	Tensão (Volts)	6,7966	6,7953	6,8095	6,7614	6,7911
	Intensidade de corrente (A)	0,0056	0,0056	0,0054	0,0063	0,0057
	Resistência elétrica	1207,211	1204,840	1270,429	1071,537	1183,118
	ρ (k Ω .cm)	1,206	1,303	1,368	0,976	1,082
	ρ (k Ω .cm) médio		1,292		1,029	
	Desvio padrão		0,082		-	
	δ (%)		6,337		-	
38	Tensão (Volts)	6,8179	6,8158	6,8273	6,7608	6,7837
	Intensidade de corrente (A)	0,0052	0,0052	0,0050	0,0063	0,0059
	Resistência elétrica	1318,743	1308,215	1370,944	1073,143	1159,607
	ρ (k Ω .cm)	1,317	1,415	1,476	0,978	1,061
	ρ (k Ω .cm) médio		1,403		1,019	
	Desvio padrão		0,080		-	
	δ (%)		5,738		-	
48	Tensão (Volts)	6,8577	6,8573	6,8692	6,8061	6,8507
	Intensidade de corrente (A)	0,0044	0,0044	0,0042	0,0054	0,0046
	Resistência elétrica	1562,118	1562,027	1651,250	1255,738	1505,648
	ρ (k Ω .cm)	1,560	1,690	1,778	1,144	1,377
	ρ (k Ω .cm) médio		1,676		1,261	
	Desvio padrão		0,110		-	
	δ (%)		6,554		-	
55	Tensão (Volts)	6,8686	6,8672	6,8798	6,8128	6,8483
	Intensidade de corrente (A)	0,0042	0,0042	0,0040	0,0053	0,0046
	Resistência elétrica	1643,206	1635,048	1732,947	1292,751	1501,820
	ρ (k Ω .cm)	1,641	1,769	1,866	1,178	1,374
	ρ (k Ω .cm) médio		1,759		1,759	
	Desvio padrão		0,113		-	
	δ (%)		6,428		-	
65	Tensão (Volts)	6,8763	6,8760	6,8875	6,8740	6,8770
	Intensidade de corrente (A)	0,0040	0,0040	0,0038	0,0041	0,0040
	Resistência elétrica	1714,788	1706,203	1812,500	1693,103	1710,697
	ρ (k Ω .cm)	1,712	1,846	1,952	1,543	1,565
	ρ (k Ω .cm) médio		1,837		1,554	
	Desvio padrão		0,120		-	
	δ (%)		6,537		-	

ANEXO S

Resistividade - série 2

Dados dos provetes de argamassa tradicional:

	1	2	3
l (m)	0,13855	0,13668	0,13932
rede 1 (m ²)	0,03844	0,0395	0,03814
rede 2 (m ²)	0,03806	0,03749	0,03736

Idade (dias)		Argamassa tradicional		
		1	2	3
2	Tensão (Volts)	6,2062	6,2059	6,1567
	Intensidade de corrente (A)	0,0173	0,0173	0,0183
	Resistência elétrica	358,326	358,308	336,432
	ρ (k Ω .cm)	0,378	0,388	0,344
	ρ (k Ω .cm) médio	0,370		
	Desvio padrão	0,023		
	δ (%)	6,256		
6	Tensão (Volts)	6,6508	6,6570	6,6220
	Intensidade de corrente (A)	0,0085	0,0084	0,0091
	Resistência elétrica	779,695	789,680	728,493
	ρ (k Ω .cm)	0,823	0,856	0,745
	ρ (k Ω .cm) médio	0,808		
	Desvio padrão	0,057		
	δ (%)	7,033		
14	Tensão (Volts)	6,9761	6,9467	6,9531
	Intensidade de corrente (A)	0,0027	0,0027	0,0025
	Resistência elétrica	2593,346	2601,760	2748,261
	ρ (k Ω .cm)	2,738	2,819	2,811
	ρ (k Ω .cm) médio	Leituras não válidas		
	Desvio padrão			
	δ (%)			
34	Tensão (Volts)	6,7468	6,7532	6,7112
	Intensidade de corrente (A)	0,0066	0,0064	0,0073
	Resistência elétrica	1026,910	1048,634	923,136
	ρ (k Ω .cm)	1,084	1,136	0,944
	ρ (k Ω .cm) médio	1,055		
	Desvio padrão	0,099		
	δ (%)	9,417		
40	Tensão (Volts)	6,7686	6,7738	6,7400
	Intensidade de corrente (A)	0,0062	0,0061	0,0067
	Resistência elétrica	1097,018	1119,636	1002,976
	ρ (k Ω .cm)	1,158	1,213	1,026
	ρ (k Ω .cm) médio	1,132		
	Desvio padrão	0,096		
	δ (%)	8,503		
48	Tensão (Volts)	6,7890	6,8070	6,7607
	Intensidade de corrente (A)	0,0057	0,0054	0,0063
	Resistência elétrica	1188,967	1265,242	1073,127
	ρ (k Ω .cm)	1,255	1,371	1,098
	ρ (k Ω .cm) médio	1,241		
	Desvio padrão	0,137		
	δ (%)	11,052		

ANEXO T
Resistividade - série 3

Idade (dias)		Argamassa tradicional			Argamassa industrial		
		1	2	3	1	2	3
8	Tensão (Volts)	6,8482	6,8417	6,8746	6,7707	6,7860	6,7764
		6,8487	6,8417	6,8734	-	6,7842	6,7757
	Intensidade de corrente (A)	0,0046	0,0047	0,0041	0,0061	0,0058	0,0060
		0,0046	0,0047	0,0041	-	0,0059	0,0061
	Resistência elétrica	1482,294	1443,397	1676,732	1102,720	1161,986	1121,921
		1485,618	1443,397	1668,301	-	1155,741	1119,950
	ρ (k Ω .cm)	1,482	1,443	1,677	1,103	1,162	1,122
		1,486	1,443	1,668	-	1,156	1,120
	ρ (k Ω .cm) médio	1,533			1,128		
	Desvio padrão	0,028			0,029		
	δ (%)	1,794			2,540		

ANEXO U

**Resistividade no ensaio de penetração por
cloretos da argamassa tradicional**

Corrente (V)	Célula 1			Célula 2			Célula 3		
	T (°C)	I (mA)	ρ (K Ω .cm)	T (°C)	I (mA)	ρ (K Ω .cm)	T (°C)	I (mA)	ρ (K Ω .cm)
7,4	24,0	798,86	1,446	23,3	845,42	1,366	24,2	648,81	1,780
7,3	23,9	820,95	1,402	23,3	846,75	1,359	24,2	632,73	1,819
7,3	23,8	851,89	1,345	23,3	861,38	1,331	24,1	690,63	1,660
7,2	23,8	896,77	1,270	23,3	875,25	1,301	24,0	731,09	1,558
7,2	23,8	921,55	1,232	23,3	889,53	1,276	24,0	684,25	1,659
7,2	23,8	936,39	1,209	23,3	900,2	1,258	23,9	684,77	1,654
7,2	23,8	946,66	1,194	23,3	910,53	1,242	23,9	715,33	1,580
7,2	23,8	955,42	1,182	23,3	920,61	1,226	23,9	779,73	1,448
7,2	23,8	963,16	1,171	23,3	936,08	1,205	23,9	830,86	1,358
7,2	23,8	975,13	1,155	23,3	939,39	1,199	23,9	802,7	1,403
7,1	23,8	1014,3	1,104	23,3	949,97	1,179	23,9	819,08	1,367
7,1	23,7	1020,8	1,095	23,3	958,52	1,167	23,8	856,16	1,306
7,1	23,7	1025,5	1,090	23,3	964,14	1,159	23,8	824,11	1,356
7,1	23,7	1032,3	1,082	23,3	974,89	1,145	23,8	877,19	1,273
7,1	23,7	1045,9	1,066	23,3	990,42	1,125	23,8	874,34	1,275
7,1	23,7	1057,9	1,052	23,3	988,33	1,126	23,8	817,95	1,360
7,1	23,7	1070,8	1,037	23,3	997,8	1,112	23,8	855,03	1,298
7,1	23,7	1083	1,023	23,3	1004,8	1,103	23,7	811,58	1,365
7,0	23,7	1095,4	1,010	23,3	1015,7	1,089	23,7	872	1,268
7,0	23,7	1105,3	0,999	23,3	1019,2	1,084	23,7	800,48	1,380
7,0	23,6	1141,5	0,962	23,3	1024,2	1,072	23,7	795,53	1,381
7,0	23,7	1143,4	0,961	23,3	1037,6	1,059	23,7	793,58	1,384
7,0	23,7	1159,9	0,945	23,3	1048,8	1,045	23,6	755,23	1,451
7,0	23,7	1160,5	0,944	23,3	1049,1	1,044	23,6	814,56	1,345
6,9	23,6	1189,2	0,916	23,3	1055	1,033	23,6	813,84	1,339
6,9	23,7	1202,6	0,904	23,4	1066,4	1,020	23,6	894,72	1,216
6,9	23,7	1215,3	0,893	23,3	1073,1	1,012	23,6	796,67	1,363
6,9	23,7	1226,7	0,883	23,3	1074,5	1,008	23,6	925,88	1,170
6,9	23,7	1238,9	0,873	23,3	1082,8	0,999	23,6	916,97	1,180
6,8	23,6	1277,4	0,842	23,3	1090,8	0,986	23,5	943,81	1,139
6,8	23,7	1276,6	0,842	23,3	1093,9	0,983	23,5	952,19	1,130
6,8	23,7	1285,5	0,836	23,3	1091,9	0,984	23,5	913,77	1,176
6,8	23,7	1301,9	0,823	23,3	1102,3	0,972	23,5	952,28	1,125
6,8	23,7	1307,5	0,819	23,3	1113,4	0,961	23,5	948,36	1,129
6,8	23,6	1323,7	0,807	23,3	1113,1	0,959	23,5	964,55	1,107
6,8	23,7	1332,5	0,800	23,3	1127,1	0,946	23,5	925,98	1,151
6,8	23,6	1347,2	0,790	23,3	1128,3	0,943	23,5	970,86	1,096
6,8	23,7	1360,6	0,780	23,3	1144	0,928	23,4	963,84	1,102
6,7	23,6	1379,4	0,768	23,3	1147,7	0,922	23,4	955,7	1,108
6,7	23,6	1382,1	0,766	23,4	1148	0,922	23,4	907,09	1,167
6,7	23,7	1413,1	0,745	23,3	1168,6	0,901	23,4	872	1,208
6,7	23,6	1418,7	0,742	23,3	1160,9	0,906	23,4	912,45	1,153
6,7	23,6	1435,5	0,731	23,4	1179,5	0,890	23,4	874,34	1,201
6,7	23,6	1449,1	0,723	23,4	1193,3	0,878	23,4	863,73	1,213
6,7	23,6	1459,8	0,717	23,4	1197,8	0,873	23,4	820,73	1,274
6,7	23,7	1464,4	0,714	23,4	1206,6	0,866	23,3	754,2	1,386
6,6	23,6	1496	0,695	23,4	1216,4	0,854	23,3	1122,7	0,926
6,6	23,7	1490,9	0,698	23,4	1218,7	0,854	23,3	1044,7	0,996
6,6	23,7	1532,7	0,674	23,3	1224	0,844	23,3	1058,7	0,976
6,6	23,7	1532,9	0,674	23,4	1238,3	0,835	23,3	1100,4	0,939
6,6	23,7	1530,5	0,675	23,4	1251,8	0,826	23,3	1093,6	0,945
6,6	23,7	1537,9	0,672	23,4	1255,9	0,822	23,3	1111	0,930
6,5	23,6	1567,9	0,656	23,4	1259,5	0,816	23,3	1137,1	0,904
6,5	23,7	1566	0,656	23,4	1271,2	0,809	23,3	1155,2	0,890
6,5	23,7	1608,1	0,635	23,4	1279,3	0,798	23,3	1093,4	0,934
6,5	23,7	1601,8	0,638	23,4	1295,7	0,789	23,3	1211,4	0,844
6,5	23,7	1597,6	0,640	23,4	1296,8	0,789	23,3	1139,6	0,898
6,5	23,7	1610,8	0,634	23,3	1303,3	0,783	23,3	1167,5	0,874
6,5	23,7	1622,6	0,628	23,3	1308,7	0,779	23,3	1174,5	0,868
6,5	23,7	1628,7	0,625	23,3	1316,8	0,773	23,3	1223,7	0,832
6,5	23,6	1655,1	0,612	23,4	1323,4	0,766	23,3	1122,1	0,903
6,5	23,7	1652,9	0,614	23,3	1330	0,762	23,3	1182,4	0,858
6,5	23,7	1657,3	0,611	23,3	1330,4	0,762	23,3	1183,7	0,856
6,4	23,7	1666,6	0,607	23,6	1337,4	0,757	23,2	1235,8	0,819
6,4	23,6	1725	0,581	24,0	1350,6	0,742	23,2	1266,8	0,791
6,4	23,7	1720,2	0,583	24,8	1359,9	0,738	23,3	1291,7	0,777
6,4	23,7	1710	0,588	25,2	1361,9	0,738	23,2	1215,4	0,827
6,4	23,7	1735	0,577	24,7	1365,9	0,733	23,2	1212,5	0,826
6,4	23,7	1724,7	0,581	24,6	1365,3	0,735	23,2	1207,5	0,831
6,4	23,7	1742,8	0,573	24,5	1378,8	0,725	23,2	1220,5	0,819
6,4	23,7	1730,4	0,579	24,4	1396,3	0,717	23,2	1268,2	0,790
6,3	23,6	1795,4	0,552	24,4	1407,1	0,704	23,2	1280,8	0,774
6,3	23,7	1802,6	0,549	24,3	1402,7	0,706	23,2	1302,8	0,760

ANEXO V
Resistividade no ensaio de penetração por
cloretos da argamassa industrial

Corrente (V)	Célula 1			Célula 2		
	I (mA)	T (°C)	ρ (K Ω .cm)	T (°C)	I (mA)	ρ (K Ω .cm)
6,9329	1042,9	24,3	1,044	22,8	1127,7	0,966
6,9353	1042,1	24,3	1,045	22,7	1153,3	0,945
6,9258	1051,6	24,2	1,035	22,8	1160,5	0,937
6,9163	1059,6	24,2	1,025	22,8	1182,1	0,919
6,9066	1067,8	24,2	1,016	22,6	1196,2	0,907
6,9019	1074,9	24,2	1,009	22,6	1199,9	0,904
6,8923	1083,5	24,2	0,999	22,6	1209,9	0,895
6,8876	1088,8	24,2	0,994	22,1	1226	0,882
6,88	1096,3	24,1	0,986	21,8	1217,4	0,888
6,8729	1102,8	24,1	0,979	21,8	1236,4	0,873
6,8634	1111,2	24,1	0,970	21,7	1252,7	0,861
6,861	1114,3	24,1	0,967	21,8	1259,8	0,855
6,8516	1122,8	24,1	0,959	21,6	1270,6	0,847
6,8491	1126	24,0	0,955	21,5	1279,2	0,841
6,842	1132,5	24,0	0,949	21,4	1282,5	0,838
6,8325	1138,3	24,0	0,943	21,4	1292,8	0,830
6,8278	1142,1	24,0	0,939	21,3	1295,4	0,828
6,8206	1151	24,0	0,931	21,3	1312,2	0,816
6,8159	1154	24,0	0,928	21,3	1318,1	0,812
6,811	1160,3	23,9	0,922	21,3	1329,3	0,805
6,804	1166,4	23,9	0,916	21,4	1333,4	0,802
6,7992	1171,1	23,9	0,912	21,4	1342,4	0,796
6,7944	1175,5	23,9	0,908	21,3	1347,8	0,792
6,7897	1179,6	23,9	0,904	21,3	1360,4	0,784
6,7826	1186,8	23,9	0,898	21,3	1370,4	0,777
6,7754	1194,3	23,9	0,891	21,3	1374,8	0,774
6,7706	1195,4	23,9	0,890	21,3	1382,7	0,769
6,7659	1200,8	23,9	0,885	21,3	1389	0,765
6,7588	1207,2	23,9	0,879	21,3	1402,9	0,757
6,7563	1211,2	23,8	0,876	21,4	1409,1	0,753
6,7468	1219,3	23,8	0,869	21,4	1423,7	0,744
6,7397	1226,3	23,8	0,863	21,2	1428,1	0,741
6,735	1230,9	23,8	0,859	21,3	1434	0,738
6,7302	1235,7	23,8	0,856	21,3	1441,4	0,733
6,723	1242,9	23,8	0,850	21,3	1456,3	0,725
6,7159	1250,1	23,8	0,844	21,3	1462,8	0,721
6,7064	1256,6	23,8	0,838	21,3	1478,4	0,713
6,6992	1264,8	23,8	0,832	21,4	1487	0,708
6,6945	1269,7	23,8	0,828	21,4	1489,6	0,706
6,6873	1274,8	23,8	0,824	21,3	1500,6	0,700
6,6802	1282,2	23,7	0,818	21,2	1506,7	0,696
6,6754	1288,1	23,7	0,814	21,3	1528,3	0,686
6,6682	1292,4	23,7	0,810	21,3	1535,2	0,682
6,6611	1300,4	23,7	0,805	21,3	1545,1	0,677
6,6539	1307,5	23,7	0,799	21,3	1553	0,673
6,6469	1313,4	23,7	0,795	21,3	1561,9	0,668
6,6396	1319,6	23,7	0,790	21,4	1573,8	0,663
6,6324	1326,8	23,7	0,785	21,5	1579,8	0,659
6,6254	1334,2	23,7	0,780	21,3	1588,1	0,655
6,6182	1340,9	23,7	0,775	21,3	1607,3	0,647
6,6134	1344,4	23,7	0,773	21,3	1622,4	0,640
6,6063	1353,2	23,7	0,767	21,3	1635,5	0,634
6,5991	1358,6	23,7	0,763	21,3	1644,1	0,630
6,5896	1365,2	23,7	0,758	21,3	1644	0,630
6,5848	1372,5	23,7	0,754	21,3	1656,3	0,624
6,5776	1378,2	23,7	0,750	21,5	1661,5	0,622
6,5704	1385,2	23,7	0,745	21,5	1679,1	0,615
6,5657	1389,3	23,7	0,742	21,4	1679,1	0,614
6,5586	1395,3	23,7	0,738	21,3	1689,2	0,610
6,5562	1399,3	23,7	0,736	21,4	1696,8	0,607
6,5442	1409,5	23,7	0,729	21,3	1702,1	0,604
6,5419	1411	23,7	0,728	21,4	1720,9	0,597
6,5371	1415,1	23,7	0,726	21,3	1726,8	0,595
6,5323	1419,7	23,7	0,723	21,3	1725,9	0,595
6,5276	1425,5	23,7	0,719	21,5	1732,4	0,592
6,5227	1428,7	23,6	0,717	21,5	1741,3	0,588
6,5204	1430,9	23,6	0,716	21,3	1742,2	0,588
6,5156	1435,7	23,6	0,713	21,3	1756	0,583
6,5084	1440,8	23,6	0,710	21,3	1759,1	0,581
6,5107	1440,3	23,6	0,710	21,3	1775,5	0,576
6,5084	1443,3	23,6	0,708	21,3	1782,2	0,574
6,5012	1450,1	23,6	0,704	21,3	1780,8	0,573
6,4989	1451	23,6	0,704	21,4	1802,8	0,566

Secil NATURAL LIME NHL 3,5

NHL 3,5 – CAL HIDRÁULICA NATURAL

TC.E.085.6

1. DESCRIÇÃO

A **Secil NATURAL LIME NHL 3,5** é uma cal hidráulica natural, ligante hidráulico constituído por silicatos e aluminatos de cálcio e hidróxido de cálcio. Obtém-se por cozedura de calcário margoso, seguida de moagem. A **Secil NATURAL LIME NHL 3,5** é classificada como NHL 3,5 segundo a NP EN 459-1.

A **Secil NATURAL LIME NHL 3,5** é um ligante singular, pois além da presa hidráulica, apresenta também presa aérea, obtida por carbonatação com o CO₂ atmosférico.

2. DOMÍNIO DE UTILIZAÇÃO

Na fabricação de argamassas, como único ligante ou em mistura com outros ligantes hidráulicos ou aéreos, conferindo-lhes trabalhabilidade e flexibilidade, reduzindo significativamente a retracção das argamassas hidráulicas (p.ex. argamassa de reboco, acabamentos ou caldas de injeção de alvenarias antigas).

Na fabricação de argamassas de reabilitação, como único ligante, em execução de rebocos exteriores e interiores sobre suportes antigos.

3. CARACTERÍSTICAS DO PRODUTO

CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS	VALOR	NORMA
Cal disponível Ca(OH) ₂	≥ 25,0 %	EN 459-1
Sulfato	≤ 2,0 %	EN 459-1
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	VALOR	NORMA
Cor	Beje	-
Água livre	≤ 1,0 %	EN 459-1
Baridade	0,60 ± 0,05 kg/dm ³	-
Densidade	2,7 g/cm ³	-
Finura	90 µm ≤ 15,0 % 200 µm ≤ 5,0 %	EN 459-1
Expansibilidade	≤ 2,0 mm	EN 459-1
Penetração	> 10 mm e < 50 mm	EN 459-1
Teor de ar	≤ 5,0 %	EN 459-1
Tempo de presa	Início > 1 h Fim ≤ 30 h	EN 459-1
CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS	VALOR	NORMA
Resistência à compressão (28 dias)	≥ 3,5 e ≤ 10,0 MPa	EN 459-1

4. APLICAÇÃO

FABRICAÇÃO DE ARGAMASSAS

A dosagem de **Secil NATURAL LIME NHL 3,5** numa argamassa deve adequar-se ao fim a que se destina. Nas argamassas de reboco e de assentamento, a **Secil NATURAL LIME NHL 3,5**, tem um papel preponderante como único ligante, ver exemplos no ponto 5.

Misturar previamente a **Secil NATURAL LIME NHL 3,5** com o agregado e posteriormente adicionar água na quantidade adequada de forma a obter uma boa trabalhabilidade.

Restrições

Não aplicar argamassas a temperaturas inferiores a 5 °C e superiores a 30 °C, evitando a aplicação em situações de elevada exposição solar e/ou sob ventos fortes.

Não utilizar argamassas amolentadas ou que tenham iniciado a sua presa.

Evitar a secagem rápida das argamassas, regando o suporte, 1 a 2 horas antes da aplicação e voltando a regar logo que a argamassa se apresente suficientemente resistente. Repetir a rega 1, 2 e 7 dias depois.

Conselhos complementares

- ▶ O excesso de água de amassadura é prejudicial às características físicas da argamassa;
- ▶ Deve ser sempre utilizada a quantidade mínima de água que permita boa trabalhabilidade;

Secil Argamassas

Secil Martingança, S.A.

Apoio ao Cliente: Apartado 2 | 2406 – 909 – Maceira – LRA – Portugal

Tel: +351 244 770 220 | Fax: +351 244 777 997 | E-mail: comercial@secilargamassas.pt



Secil NATURAL LIME NHL 3,5

NHL 3,5 – CAL HIDRÁULICA NATURAL

TC.E.085.6



Pedreira



Fábrica de Cal Hidráulica



Pedra cozida

- ▶ A água de amassadura deve estar isenta de quaisquer impurezas (argilas, matéria orgânica), devendo, de preferência, ser utilizada água potável;
- ▶ Uma vez determinado o traço a utilizar para uma argamassa, manter as dosagens constantes e o tempo de amassadura.

Validade

12 meses desde que permaneçam inalteradas as condições da embalagem originais e em condições de armazenagem ao abrigo de temperaturas extremas e da humidade.

- ▶ Manter fora do alcance das crianças;
- ▶ Usar luvas de proteção/ vestuário de proteção/ proteção ocular/ proteção facial;

6. EMBALAGEM E VALIDADE

Embalagem

- ▶ Sacos de papel de 25 kg em paletes plastificadas;
- ▶ Granel para utilização em sistema de silo.



7. HIGIENE E SEGURANÇA

(NÃO DISPENSA A CONSULTA DA FICHA DE SEGURANÇA DO PRODUTO)

- ▶ Provoca irritação da pele;
- ▶ Provoca danos graves nos olhos;
- ▶ Pode provocar irritação respiratória;
- ▶ Evitar respirar poeiras/ vapores.

5. TRAÇOS RECOMENDADOS

TRAÇOS DE ARGAMASSA RECOMENDADOS	MATÉRIAS PRIMAS (VOLUME)				Água % peso do total	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)			MÓDULO DE ELASTICIDADE (MPa) 28 dias
	NHL 5	Sílica fina (< 0,6 mm)	Sílica fina (< 1,2 mm)	Sílica de rio (< 2,5 mm)		7 dias	28 dias	90 dias	
Argamassa de revestimento (ligante:agregado) = (1:3)	1	1	1	1	15,0	0,3	0,9	1,5	3300
Argamassa de revestimento (ligante:agregado) = (1:4)	1	1,5	1,5	1	15,0	0,2	0,5	0,6	1970

Secil Argamassas

Secil Martingança, S.A.

Apoio ao Cliente: Apartado 2 | 2406 – 909 – Maceira – LRA – Portugal

Tel: +351 244 770 220 | Fax: +351 244 777 997 | E-mail: comercial@secilargamassas.pt



www.secilargamassas.pt

Secil NATURAL LIME NHL 3,5

NHL 3,5 – CAL HIDRÁULICA NATURAL

TC.E.085.6

Estando as condições de aplicação dos nossos produtos fora do nosso alcance não nos responsabilizamos pela sua incorrecta utilização. É dever do cliente verificar a idoneidade do produto para o fim previsto. Em qualquer caso a nossa responsabilidade está limitada ao valor da mercadoria por nós fornecida. A informação constante da presente ficha pode ser alterada sem aviso prévio. Em caso de dúvida, e se pretender esclarecimentos complementares solicitamos o contacto com os nossos serviços técnicos.

Revisão de Outubro de 2014
TC.E.085.6



11

Secil Natural Lime NHL 3,5

EN 459-1:2011

Certificado: 1328-CPR-0215

Cal Hidráulica Natural – NHL 3,5

Declaração de desempenho TC.E.0915

Secil Argamassas

Secil Martingança, S.A.

Apoio ao Cliente: Apartado 2 | 2406 – 909 – Maceira – LRA – Portugal

Tel: +351 244 770 220 | Fax: +351 244 777 997 | E-mail: comercial@secilargamassas.pt



REABILITA Cal Reboco

REBOCO DE ENCHIMENTO À BASE DE CAL HIDRÁULICA NATURAL

TC.E.061.2

1. DESCRIÇÃO

O **REABILITA Cal Reboco** é uma argamassa seca formulada exclusivamente a partir de cal hidráulica natural. Incorpora agregados silíceos e calcários criteriosamente seleccionados e adições, dispondo de propriedades particulares de tixotropia, aderência, resistência química e durabilidade particularmente adaptadas à função a que se destina.

O **REABILITA Cal Reboco** é vocacionado para a aplicação projectada, podendo no entanto ser aplicado manualmente.

2. DOMÍNIO DE UTILIZAÇÃO

O **REABILITA Cal Reboco** foi especialmente concebido para conservação e reabilitação do edificado, sendo destinado ao revestimento de alvenarias antigas ou de construção nova. O **REABILITA Cal Reboco** é aplicado como camada de enchimento e regularização em suportes antigos consolidados com o **REABILITA Cal Consolidação**, ou directamente sobre os suportes quando estes apresentarem as características físicas e mecânicas apropriadas. Deste modo, **REABILITA Cal Reboco** pode ser aplicado sobre betão e alvenarias de tijolo cerâmico ou blocos de betão ou alvenaria de pedra.

A utilização exclusiva do ligante de Cal Hidráulica Natural e a sua composição especial resulta numa excelente compatibilidade com os suportes antigos, onde para além da compatibilidade física e mecânica se destaca a elevada compatibilidade química.

3. CARACTERÍSTICAS DO PRODUTO

PRODUTO EM PÓ	VALOR	NORMA
Granulometria	< 3,5 mm	-

PRODUTO EM PASTA	VALOR	NORMA
Água de amassadura	19,5 ± 1,0 %	-
Ar contido	25,0 ± 5,0 %	EN 1015-6
Consumo teórico	14,0 kg/m ² /cm	-

PRODUTO ENDURECIDO	VALOR	NORMA
Resistência à compressão	Classe CS II	EN 1015-11
Aderência ao tijolo e bloco / Modo de fractura	≥ 0,2 MPa / A e B	EN 1015-12
Módulo de elasticidade	2000-4000 N/mm ²	BS 1881-5
Massa volúmica	1400 ± 100 kg/m ³	EN 1015-10
Capilaridade (24h)	≥ 0,3 kg/m ²	EN 1015-18
Permeabilidade ao vapor de água μ	< 15	EN 1015-19
Penetração de água após ensaio de capilaridade	< 5,0 mm	EN 1015-18
Reacção ao fogo	Classe A1	EN 988-1
Condutibilidade térmica	0,47 W.(m/K) (P=50%)	NP EN 1745

4. APLICAÇÃO

Preparação de suportes

Os suportes preparados com a argamassa **REABILITA Cal Consolidação** estão aptos a receber o **REABILITA Cal Reboco**.

No caso de aplicação directa sobre suportes em alvenaria estes devem encontrar-se coesos, limpos, sem qualquer tipo de material que afecte as normais condições de aderência.

Preparação da argamassa

O **REABILITA Cal Reboco** deve ser amassado em equipamento de projecção com pré-amassadura do produto.

Secil Argamassas

Secil Martingança, S.A.

Apoio ao Cliente: Apartado 2 | 2406 – 909 – Maceira – LRA – Portugal

Tel: +351 244 770 220 | Fax: +351 244 777 997 | E-mail: comercial@secilargamassas.pt



www.secilargamassas.pt

REABILITA Cal Reboco

REBOCO DE ENCHIMENTO À BASE DE CAL HIDRÁULICA NATURAL

TC.E.061.2

Em máquinas sem doseamento automático de água amassar o **REABILITA Cal Reboco**, na proporção de 4,5 a 5,0 litros de água por saco de 25 kg.

Em máquinas com doseamento automático de água regular o caudal mínimo de água que permita uma boa trabalhabilidade.

Aplicação

Para a aplicação deve fazer-se uso das boas práticas subjacentes à realização de rebocos de aplicação projectada, prevendo o aperto da argamassa, o talochamento, a utilização de reforços com rede de fibra de vidro nas áreas de concentração de tensões, tais como, transições de suportes, vértices de vãos, cunhais, etc., entre outros cuidados importantes para o sucesso da aplicação. Em suportes de betão liso deve proceder-se de forma idêntica, todavia terá de aplicar-se, imediatamente antes, uma ponte de aderência com recurso ao produto **SecilTEK AD 90**.

Não deverão ser executadas camadas com espessuras superiores a 2,0 cm nem inferiores a 1,0 cm.

A superfície do **REABILITA Cal Reboco** deve ser finalizada com a técnica tradicional de talochamento preparando a mesma para o recebimento da camada de acabamento final com o produto **REABILITA Cal Acabamento**.

Por se tratar de situações específicas em cada trabalho de reabilitação, deverão ser consultados os nossos Serviços Técnicos no momento de selecção dos produtos.

Restrições

O **REABILITA Cal Reboco** não deve ser aplicado a temperaturas ambientes e de suporte inferiores a 5 °C e superiores a 30 °C. O seu tempo de cura é de 28 dias.

Em tempo quente e/ou seco ou no caso de suportes expostos à acção directa dos raios solares, deve humedecer-se previamente o suporte iniciando a aplicação quando este se mostrar seco.

Nestas condições deve proceder-se à rega diária das superfícies executadas, durante uma semana, de forma a manter os rebocos permanentemente humedecidos.

A aplicação na presença de ventos fortes pode provocar a fissuração do reboco. Neste caso proceder à protecção dos paramentos de modo a minimizar os efeitos da acção do vento.

Conselhos complementares

- ▶ A água de amassadura deve ser isenta de impurezas (argila, matérias orgânicas), devendo, de preferência, ser potável;
- ▶ Não deve ser aplicada qualquer argamassa que tenha ultrapassado o seu tempo aberto. Não amolentar as argamassas pela adição de água, após preparação;
- ▶ Não adicionar quaisquer outros produtos à argamassa, devendo a **REABILITA Cal Reboco**, ser aplicada tal como é apresentada na sua embalagem de origem.

5. EMBALAGEM E VALIDADE

Embalagem

Sacos de papel de 25 kg em paletes plastificadas de 60 sacos;



Validade

12 meses desde que permaneçam inalteradas as condições da embalagem originais e em condições de armazenagem ao abrigo de temperaturas extremas e da humidade.

6. PRODUTOS ASSOCIADOS

- ▶ **REABILITA Cal Consolidação**
(Argamassa para consolidação e encasque de alvenarias antigas)
- ▶ **REABILITA Cal Acabamento**
(Argamassa de acabamento transpirável)
- ▶ **Linha de produtos REABILITA**
(Produtos para reabilitação/renovação)
- ▶ **SecilTEK AD 90**
(Ponte de aderência monocomponente)

Secil Argamassas

Secil Martingança, S.A.

Apoio ao Cliente: Apartado 2 | 2406 – 909 – Maceira – LRA – Portugal

Tel: +351 244 770 220 | Fax: +351 244 777 997 | E-mail: comercial@secilargamassas.pt



REABILITA Cal Reboco

REBOCO DE ENCHIMENTO À BASE DE CAL HIDRÁULICA NATURAL

TC.E.061.2

7. HIGIENE E SEGURANÇA

(NÃO DISPENSA A CONSULTA DA FICHA DE SEGURANÇA DO PRODUTO)

- ▶ Irritante para os olhos, vias respiratórias e pele;
- ▶ Pode causar sensibilização em contacto com a pele;
- ▶ Não respirar as poeiras;
- ▶ Evitar o contacto com a pele e os olhos;
- ▶ Em caso de contacto com os olhos, lavar imediatamente e abundantemente com água e consultar um especialista;
- ▶ Usar vestuário de protecção e luvas adequadas;
- ▶ Conservar fora do alcance das crianças.

Estando as condições de aplicação dos nossos produtos fora do nosso alcance não nos responsabilizamos pela sua incorrecta utilização. É dever do cliente verificar a idoneidade do produto para o fim previsto. Em qualquer caso a nossa responsabilidade está limitada ao valor da mercadoria por nós fornecida. A informação constante da presente ficha pode ser alterada sem aviso prévio. Em caso de dúvida, e se pretender esclarecimentos complementares solicitamos o contacto com os nossos serviços técnicos.

*Revisão de Agosto de 2013
TC.E.061.2*



11

REABILITA Cal Reboco

EN 998-1:2010

Argamassa de renovação (R) para revestimentos interiores e exteriores

Declaração de desempenho TC.E.0986

Secil Argamassas

Secil Martingança, S.A.

Apoio ao Cliente: Apartado 2 | 2406 – 909 – Maceira – LRA – Portugal

Tel: +351 244 770 220 | Fax: +351 244 777 997 | E-mail: comercial@secilargamassas.pt



3/3

www.secilargamassas.pt